Vida

Edoardo Boncinelli

filosofía e historia / fundamentales



Edoardo Boncinelli

Vida

Traducción de Ana Miravalles



Adriana Hidalgo editora

Boncinelli, Edoardo
Vida. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Adriana Hidalgo editora, 2015
174 p. ; 17x12 cm. - (filosofía e historia / fundamentales)

Traducido por: Ana Miravalles
ISBN 978-987-3793-46-2

1. Filosofía. I. Miravalles, Ana, trad. II. Título
CDD 190

filosofía e historia / fundamentales

Título original: *Vita*
Traducción: Ana Miravalles

Editor: Fabián Lebenglik
Diseño: Tobías Wainhaus

1ª edición en Argentina
1ª edición en España

www.adrianahidalgo.com

ISBN Argentina: 978-987-3793-46-2
ISBN España: 978-84-15851-61-5

Se agradece a la Dra. Alicia B. Miravalles la revisión de los términos biológicos en la presente traducción castellana.

Impreso en Argentina
Printed in Argentina
Queda hecho el depósito que indica la ley 11.723

Vida

1. Algunos hechos de la vida

La palabra vida se utiliza con frecuencia para indicar una cantidad de cosas diferentes, incluso a veces al mismo tiempo, pero acá la emplearé exclusivamente para hacer referencia a la vida orgánica y biológica. La vida bulle a nuestro alrededor, y nosotros mismos somos seres vivientes, aunque muy particulares. Quisiera aclarar, además, que con el término vida me refiero tanto al conjunto de los seres vivientes como a sus vicisitudes, pasadas y presentes, y también a la cualidad abstracta que los caracteriza y los distingue de los objetos inanimados que se encuentran sobre la tierra y en cualquier otra parte del universo.

Conviene decir desde el inicio que la vida en su conjunto se articula sobre una multiplicidad de planos o niveles de organización, desde la más minúscula organela subcelular presente en el cuerpo de un organismo singular hasta la biosfera. Esto la vuelve única y, a la vez, increíblemente compleja.

Por lo general se considera al organismo como su unidad fundamental y el eje en torno al cual todo

gira. En efecto, el organismo, tanto si consta de una sola célula o de muchísimas, representa la estructura orgánica más pequeña de la que puede decirse que vive una vida autónoma; está constituido a su vez por estructuras organizadas aún más pequeñas, y forma parte de comunidades cada vez más grandes. Por debajo del organismo están, en orden, los aparatos, los órganos, los tejidos, las células, las organelas y por último las moléculas; por encima, están la población, la comunidad, el ecosistema y la biosfera en su conjunto. Paralelo al desfase espacial causado por la diferencia de escala, existe además un cierto desfase temporal entre estos planos de organización: las entidades más grandes viven por más tiempo que las más pequeñas y aseguran su continuidad en el tiempo.

En el estudio de la biología existen dos tipos de tensiones esenciales: la que atribuye la existencia de cada organismo a los mecanismos internos que lo mantienen con vida y le permiten actuar, y la que lo vincula a las comunidades biológicas supraindividuales cada vez más amplias. En su trabajo de campo, el naturalista y el biólogo se ocupan habitualmente de estas últimas conexiones, mientras que el fisiólogo, el bioquímico, el genetista y, sobre todo, el biólogo molecular se interesan por las primeras, pero sin que ninguno de

ellos pueda tener la pretensión de ser el estudioso de la vida en exclusiva. Por lo general, se pertenece a uno u otro campo, por vocación o por circunstancias históricas, pero no se puede evitar la conclusión de que un correcto encuadre del fenómeno "vida" no puede prescindir de la contribución de ambas perspectivas. Porque la vida es lo que es únicamente gracias a la actividad de procesos moleculares, pero tampoco podría existir sin una multiplicidad de interacciones, directas e indirectas, entre sus diferentes representantes.

Al igual que todos los objetos de investigación científica, la vida se puede describir, o se puede intentar explicarla. Yo daré preeminencia aquí al aspecto de la explicación, pero es necesario poner de relieve el hecho de que el tema impone, de todos modos, un fuerte componente descriptivo y narrativo, mucho mayor del que se necesita para otras ciencias, especialmente para la física, la disciplina a cuyas explicaciones y estatutos estamos habituados desde hace más tiempo. En la biología hay mucho por describir –existen, por ejemplo, más de diez millones de especies diferentes y al exponerlas es prácticamente inevitable recurrir a un elevado número de siglas– y muchas historias por contar en el marco de lo que en otras épocas se denominaba historia natural. Sin

embargo, aunque descripción y relato son esenciales en la biología, sin duda, a nosotros también nos gusta comprender.

¿Qué es la vida? En otras palabras, ¿cuáles son las características distintivas de los seres vivientes, desde los leopardos hasta los líquenes, desde las magnolias hasta los paramecios?

Partamos de las características más notables. En primer lugar, el movimiento. Los animales, grandes y pequeños, se mueven y mueven algunas de sus partes, a tal punto que si percibimos que algo se mueve, inmediatamente pensamos que se trata de un ser viviente. Los objetos inanimados no se mueven por sí mismos sino que por el contrario son movidos ya sea por un ser viviente, o por el viento, el agua, la gravedad o el calor. Puede parecer que las plantas no se mueven y que constituyen por ello una excepción a esta regla, pero no es así. Utilizando los instrumentos adecuados se puede advertir cómo en su interior y dentro de sus células se produce el mismo movimiento frenético y el mismo flujo incesante de materia que se observa dentro de las células animales.

Por lo tanto, la vida no puede separarse del movimiento, sobre todo interno, y no podría ser de otro

modo. Estar vivos significa tener la posibilidad de mover y encauzar cantidades de material, ya sean minúsculas o conspicuas, de un punto a otro y bajo un control atento, aun cuando con frecuencia los procesos que tienen lugar a nivel intracelular nos parezcan caóticos. Mucho más fácil de descifrar nos resulta el movimiento externo, característico de los animales, que se asocia generalmente al desplazamiento de su baricentro, movimiento denominado entonces, con mayor propiedad, locomoción.

Sin embargo, ningún ser viviente se limita a esto. Está también la sensibilidad y la consiguiente capacidad de reacción. Desde los más elementales hasta los más complejos, los seres vivientes viven en el mundo y son sensibles a por lo menos alguno de sus aspectos, al que pueden responder en diferente medida. Los aparatos que les confieren esta sensibilidad y los que median las reacciones consiguientes pueden variar enormemente de una especie a otra y se vuelven cada vez más complejos a medida que se recorre la escala evolutiva, desde las simples criaturas unicelulares capaces de acercarse a una cosa o alejarse de otra, hasta el enorme desarrollo de nuestros órganos de los sentidos y a nuestro aparato de relación. La capacidad de recibir señales y de reaccionar es un rasgo universal

de los seres vivientes, y está ya presente en su unidad constitutiva fundamental, la célula.

Con el pasaje de la vida unicelular a la vida pluricelular cambiaron muchas cosas. Las diferentes funciones, desempeñadas en principio por las distintas partes de la célula, se asignan ahora a grupos más o menos numerosos de células que llegan a constituir órganos y aparatos. No es una excepción la función sensorial, siempre en estrecha relación con la capacidad de responder a los estímulos, por lo general con un movimiento aunque sea mínimo. La regulación de la capacidad de recibir estímulos del mundo circundante y de organizar una respuesta adecuada se convierte en la tarea principal del sistema nervioso, que se complejiza y se jerarquiza progresivamente hasta transformarse en el centro de control fundamental de las múltiples funciones biológicas distribuidas en las diferentes partes del cuerpo.

Así, el sistema nervioso representa todo lo que a lo largo de los milenios fue interponiéndose entre un estímulo y la consiguiente respuesta, núcleo esencial del comportamiento de los seres vivos. El desarrollo de estos aparatos en los animales evolucionados dio lugar a las infinitas articulaciones de la vida de relación, como respuesta a los hechos o a la acción de

otros seres vivientes. Nunca estará de más insistir en que la sensibilidad y la capacidad de percibir están intrínsecamente orientadas a la acción: todo organismo de cualquier especie percibe del mundo sólo lo que le sirve para actuar o, para decirlo mejor, para poner en práctica un comportamiento apropiado.

En general, estamos en condiciones de reconocer la intención y, por lo tanto, la motivación de muchos movimientos y acciones. Una característica de muchos seres vivientes es justamente la intención: parecen querer hacer algo y ponerse en acción para lograrlo. Los seres vivos se mueven y mueven sus partes con una intención: la intención apareció en la Tierra con la vida, así como antes había aparecido la función. Las células, los tejidos, los órganos y los aparatos tienen una función; los organismos, en su conjunto, actúan casi siempre guiados por una intención.

La función es, por decirlo así, una especie de intencionalidad inconsciente de las cosas de la vida que solamente nosotros logramos comprender, si es que lo logramos. Se dice que un proceso o una estructura tienen una función cuando se llega a comprender su utilidad para algún fin biológico. Así, puede decirse que la membrana que envuelve a la célula tiene la función de protegerla, pero se trata de una interpretación

nuestra, humana, más o menos fundamentada: la membrana misma no puede saber nada de esto. Cabría preguntarse entonces por qué la membrana cumple esa función, o por qué el núcleo celular tiene la función de conservar celosamente el ADN de esa misma célula.

Una y otro lo hacen porque milenios y milenios de evolución biológica, es decir, de selección natural, los obligan a hacerlo. La evolución es, por lo tanto, la causa profunda o remota de la existencia de las funciones de las que estamos hablando. Pero, materialmente, ¿quién obliga a las diferentes estructuras a cumplirlas? O sea, ¿cuál es la causa inmediata, o próxima, de su funcionalidad? Se trata del conjunto de "instrucciones de uso" aportadas por el patrimonio genético de la propia célula, inscriptas en una molécula gigante de ADN, y de la acción colectiva de todas las demás estructuras biológicas, o al menos de las que están inmediatamente vinculadas con ellas. Las funciones biológicas están bajo el estricto control del pasado y del presente de cada organismo, mientras que las intenciones, a pesar de estar relacionadas con el logro de un fin biológico determinado, son relativamente más libres y objeto de un mayor número de mediaciones. Para tener una intención, es necesario poseer

un sistema nervioso al menos elemental, mientras que para tener una función, esto obviamente no es necesario.

La función es una propiedad característica de la materia viva. Antes de la vida no existían funciones, solo eventos o a lo sumo procesos. No tiene sentido, por ejemplo, afirmar que la fuerza de gravedad tiene la función de mantener a la Tierra en la órbita del Sol, así como no tiene sentido suponer que el núcleo de los átomos tiene el rol o la función de mantener sujetos los electrones que giran a su alrededor. Simplemente son cosas que pasan, aun cuando sucedan en respuesta a leyes fundamentales de la naturaleza. Del mismo modo, no tiene sentido considerar que un chorro de aire caliente ascendente puede tener la función de generar una tromba. En conclusión, en el mundo inanimado no existen las funciones en el verdadero sentido de la palabra, pero sí abundan, en cambio, en el mundo de la vida.

Simultáneamente con la función, surgió la estructura biológica, es decir, la forma material ordenada y persistente a lo largo tiempo o, para ser más precisos, durante un lapso de tiempo determinado. Los seres vivientes están constituidos en primer lugar por estructuras que luego se revelan inevitablemente funcionales

e interactuantes. Más aún, cada minúscula estructura biológica está formada a su vez por estructuras aún más pequeñas que interactúan entre sí.

También acerca de muchos objetos inanimados puede decirse que tienen una estructura, pero se trata por lo general de estructuras poco complejas y articuladas –y fundamentalmente inmutables o al menos inmutables por sí mismas–, mientras que las estructuras biológicas, consideradas en su esencia más profunda, sólo pueden aparecer como la fotografía instantánea de un haz de procesos que tienen una función específica. Estructura y función se implican y se definen la una a la otra. Podemos decir, en efecto, tanto que una cierta estructura cumple a lo largo del tiempo una determinada función como que una función específica exterioriza las peculiaridades de una estructura y contribuye a definirla. Las estructuras biológicas son dinámicas, y están estrechamente articuladas y asociadas a una o más funciones. Para ser más precisos, están asociadas a una función en su conjunto y a una multiplicidad de funciones en las diferentes subestructuras que las constituyen.

El concepto de estructura puede ser asociado de cierto modo al de forma. La forma es el conjunto de rasgos distintivos del aspecto exterior de un objeto, animado

o inanimado, así como también el fundamento posible de sus funciones, activas y pasivas. En principio, la forma puede ser la misma para objetos constituidos por materiales diversos. También los objetos inanimados tienen una forma, pero los seres vivientes y sus partes tienen una relación muy particular con la forma, que persiste a pesar del cambio.

Esta es, de hecho, otra característica esencial de la vida, aun cuando no resulta tan fácil de apreciar a simple vista: la persistencia en el cambio, que se manifiesta en todos los niveles y en todas las escalas temporales. La vida persiste y cambia o, si se prefiere, cambia y persiste, y en definitiva se transforma sin cesar. En sus microestructuras cambia en lapsos relativamente breves, mientras que en sus estructuras más amplias y evidentes se transforma más lentamente a lo largo del tiempo. ¿Cómo puede una estructura o un conjunto de estructuras cambiar y persistir al mismo tiempo? Se trata de un interrogante que remite a una cuestión de importancia fundamental, muy cercana a la esencia misma del fenómeno vida.

Las estructuras biológicas, incluso las más pequeñas, están compuestas de partes, interconectadas y con frecuencia interactuantes, y estas a su vez están

formadas por partes más pequeñas, hasta que se llega al nivel de las moléculas e incluso de los átomos. Algunas de estas partes pueden cambiar continuamente, pero la estructura puede seguir reconociéndose como la misma, al menos mientras hay vida. Con un juego de palabras podríamos decir que cambia su materia pero no su forma. (Muy probablemente fue sobre la base de una observación como esta que Aristóteles llegó en su momento a la definición de los conceptos de materia y de forma, que conjuntamente constituyen el fundamento, según su modo de ver, de la realidad de las cosas). Pero sería poco más que un juego de palabras, porque esta es en el fondo la definición de estructura biológica, que cambia y funciona, manteniéndose igual a sí misma.

Es necesario prestar cierta atención a la dinámica temporal de este cambio en la persistencia. En lapsos muy breves las diferentes partes que componen una estructura contribuyen a las funciones desarrolladas, por eso se transforman dentro de ciertos límites, pero permanecen iguales a sí mismas y siguen estando constituidas más o menos por los mismos átomos. Sin embargo, en lapsos sólo apenas más extensos es posible observar una sustitución física de todos los átomos que las componen: los existentes desaparecen

y aparecen en su lugar otros nuevos, aun cuando sean del mismo tipo. La estructura en su conjunto, por lo tanto, no cambia, pero sus componentes atómicos, sí.

Lo reiteramos. Las microestructuras subcelulares, tanto dentro de las células como en el espacio intercelular se pueden mover, con frecuencia cíclicamente, o dar lugar a transformaciones bioquímicas (estas a veces también son cíclicas), pero permaneciendo siempre idénticas a sí mismas por segundos, minutos o incluso horas. Mantienen así una regularidad y una sucesión ordenada de partes cuyo ordenamiento de conjunto es justamente lo que define a la estructura misma. Algunas estructuras biológicas permanecen funcionalmente iguales a sí mismas incluso durante años, y constituyen las bases materiales de la "fábrica del cuerpo" y del instrumental de la vida.

Pero si se observan los componentes últimos de esas estructuras, es decir, cada uno de los átomos que las constituyen, se advierte que su identidad física cambia continuamente a lo largo del tiempo, a mayor o menor velocidad. Una estructura biológica permanece igual a sí misma, cualquiera que sea la función que cumpla y también a pesar de la continua sustitución de sus componentes. Los átomos de las sustancias orgánicas pueden ser marcados de diferentes

maneras para poder distinguirlos individualmente. Gracias a estos métodos hemos advertido ya desde hace tiempo este continuo proceso de sustitución de los componentes atómicos de todas las estructuras biológicas, desde la membrana celular hasta las diferentes organelas internas, desde el conjunto de los cromosomas hasta el ADN mismo. Sí, incluso el ADN, la molécula que debería permanecer intacta más que ninguna otra ya que es portadora de las instrucciones de la vida, se renueva constantemente por la sustitución lenta pero inexorable de todos los átomos que lo constituyen, aun cuando obviamente su mensaje permanece intacto.

Cada estructura, grande o pequeña, tiene su propio ritmo de sustitución, pero ninguna escapa a este fenómeno. ¿Por qué? ¿Cuál es la necesidad de un gigantesco programa de sustitución y renovación como este? No lo sabemos con exactitud, pero podemos al menos formular una hipótesis. Todas las estructuras, de la primera a la última, tienen que regenerarse de manera continua, muy probablemente para que exista la absoluta certeza de que son tales como deben ser, y de que no han sufrido traumas causados por el medio ni han acumulado errores debidos al simple paso del tiempo.

Las cicatrizaciones y todos los procesos de autorreparación que tienen lugar a diario en cada parte de nuestro cuerpo no son sino la consecuencia macroscópica de ese proceso. El punto es que todo tiene que ser reemplazado, sí o sí, sea o no necesario. En consecuencia, podríamos suponer por el momento que cada átomo de cada estructura tiene que ser sustituido en el marco de un amplio proceso de "revisión" periódica de todas las partes de la "máquina" de la vida.

El desarrollo y el crecimiento representan una variante particular del mantenimiento de la forma. Con el paso del tiempo los organismos superiores pluricelulares crecen y se desarrollan. Dejando de lado el desarrollo embrionario, observamos continuamente que, con los años, muchos organismos crecen. En ese proceso –concomitante con todo lo que hemos venido diciendo hasta acá–, el organismo en su conjunto aumenta sus dimensiones, y en su interior muchas estructuras crecen, aunque no todas en la misma cantidad y al mismo ritmo. Una característica fundamental de los organismos superiores es precisamente que crecen permaneciendo iguales a sí mismos, en la totalidad y en los detalles.

Finalmente, los seres vivientes se reproducen. Un organismo genera uno o más organismos. Innumerables son los modos en que esto sucede, pero todos los

seres vivientes se reproducen: reproducirse es parte integrante del vivir. En efecto, en el cuadro de conjunto de la vida, no reproducirse equivale a no haber siquiera existido.

Hablando en general, los objetos inanimados no se replican. Además, carecen de todos los pasos intermedios y preparatorios. Existe una continuidad de fondo, por lo tanto, entre la conservación de la forma de las estructuras funcionales y la capacidad de reproducirse, aunque los mecanismos que permiten tal reproducción son muy variados.

Conviene señalar cómo, con la reproducción, se establece una continuidad entre las generaciones y cómo algo de los diferentes organismos se perpetúa más allá de la vida de cada individuo. Con el mecanismo de la reproducción un organismo específico pasa a formar parte de una cadena temporal de organismos que tienen cierto número de cosas en común. Es esta continuidad la que da un sentido al concepto de transmisión del ADN y del patrimonio genético. El patrimonio genético es justamente lo que vincula entre sí a los organismos de diferentes generaciones de un mismo linaje.

Persistir y reproducirse son fenómenos propios de los seres vivientes, así como lo es el evolucionar. Hasta

hace algún tiempo esto no era reconocido abiertamente, pero hoy es más que evidente, desde el momento en que el punto de vista evolucionista ha penetrado imperiosamente en todo el pensamiento biológico. Los propios mecanismos con los cuales los seres vivientes se mantienen y reproducen son los que favorecen su evolución en el tiempo, si es que no la provocan directamente Para poder dividirse las células necesitan duplicar el patrimonio genético aportado por su ADN.

El mecanismo de duplicación, es decir, de copia del ADN es muy fiel pero no está exento de errores; en la vida de un organismo los errores son más bien la regla antes que la excepción. Al reproducirse, todos los seres vivos pueden entonces generar algún error y por lo tanto variar; poco, obviamente, ya que de otro modo sería un desastre, pero siempre lo suficiente como para estar en condiciones de asegurar un cambio continuo.

Muchos quedan perplejos al oír que el error está en la base del proceso evolutivo y que una serie de errores ha llevado a los seres vivientes a ser lo que son. Por eso resulta oportuna una explicación acerca del uso del término error y sobre su relación con la continua generación de cambios. Si adoptamos el criterio de que el genoma debe ser copiado del modo más fiel posible, cualquier alejamiento con respecto

al mensaje original ha de ser considerado un error, es decir, una equivocación, pero eso no significa que se trate de errores en sentido absoluto, ya que incluso nosotros no seríamos más que el resultado de una acumulación de errores. Desde el punto de vista de la historia de la vida, los que hemos definido como "errores" se presentan, en realidad, como novedades y fuentes potenciales de cambio, muchas veces sumamente productivo, e incluso creativo.

Es preciso agregar que dichos cambios no son completamente arbitrarios y que todo queda registrado en el ADN del patrimonio genético. No son los organismos los que evolucionan, sino su ADN. Los hijos no heredan de sus padres manos, pies, garras o cornamenta sino que heredan los genes para formar sus manos, pies, garras o cornamenta. Se trata de una observación banal, pero que tiende a ser olvidada con frecuencia cuando se afirma que son los órganos, las funciones o los organismos los que evolucionan. En suma, no se heredan las diferentes partes del cuerpo sino los genes encargados de formarlas.

¿Sobre la base de qué mecanismos se articula el proceso evolutivo? Fundamentalmente dos: la creación continua de novedades biológicas a cargo de los

miembros de las distintas poblaciones, y la selección que sobre ellos opera el ambiente en el que viven.

Hemos visto recién cómo se originan las novedades. Éstas luego son introducidas en el flujo de la vida, es decir, los organismos en los que se producen viven su vida como parte de la población a la que pertenecen. En cada población tiene lugar una tremenda selección porque no todos los organismos existentes en una generación dada dejarán el mismo número de descendientes, si es que dejan alguno. Es el ambiente en el que viven el que decide quién debe dejar más herederos y quién, menos. Este proceso se denomina selección natural, y es inapelable e incuestionable. El resultado de todo esto –es decir, la producción continua de novedades y su selección– es lo que denominamos evolución.

El hecho de que los seres vivientes evolucionen tiene por lo menos dos importantes consecuencias. En primer lugar, con el paso de las generaciones, la diferencia entre los organismos sólo puede aumentar porque habrá un continuo aporte de individuos diferentes –muy o muy poco diferentes– en cada población. Suele afirmarse que la evolución lleva a un aumento de la complejidad de los seres vivientes. Como veremos, esto no es cierto, o no es necesariamente cierto, pero puede observarse un constante

aumento de la diversidad. Experimentando una y otra vez, la evolución produce organismos cada vez más diferentes entre sí, al menos hasta un cierto punto en el que se alcanza una condición de equilibrio: muchas novedades surgen y otras tantas se destruyen.

En segundo lugar, el modo en que los organismos evolucionan es, por su propia naturaleza, imprevisible y errático. No está escrito en ningún lado que en una determinada generación vaya a producirse tal o cual novedad genética determinada. Ni siquiera de manera general podría preverse qué cambios se producen en una generación dentro de una población dada. El inventario de los cambios posibles no es cerrado y ni siquiera está dicho que estos vayan a presentarse de una en una. Lo que al día de hoy sabemos sobre los mecanismos genéticos y sus jerarquías nos permite afirmar que, al menos en teoría, cualquier tipo de novedad es posible y no pueden ser excluidas ni siquiera verdaderas revoluciones genéticas, tal como la historia de la vida lo demuestra abundantemente.

Tampoco es previsible qué novedad de entre las que surjan en una población dada en una determinada generación quedará seleccionada: todo es imprevisible a priori y observable sólo a posteriori. Esto convierte a la biología en una ciencia histórica en la

cual aquello que ocurrió en un determinado momento podía haber sucedido, o no. Nosotros observamos a posteriori lo que ocurrió, pero no había necesidad alguna de que ocurriera de ese modo. A diferencia de las ciencias físicas, en la biología reina la contingencia. Esta circunstancia, unida a la enorme amplitud de los tiempos implicados, hace de la biología un objeto de estudio muy particular y lleva a que el proceso evolutivo resulte mucho menos acorde a nuestra intuición y a nuestro modo habitual de pensamiento basado en causas y efectos.

Aun habiendo escrito ciento cincuenta años atrás, Darwin es tan plenamente consciente de la diferencia entre las ciencias físicas y la biología que en la conclusión de su obra maestra de 1859, *El origen de las especies*, escribe:

> Hay algo grandioso en esta concepción de la vida, con sus diferentes fuerzas, originariamente grabadas en pocas formas, o en una forma sola; y en el hecho de que, mientras nuestro planeta ha seguido girando según la inmutable ley de gravedad, a partir de un inicio tan simple, innumerables formas, bellísimas y maravillosas, han evolucionado y siguen evolucionando.

Es decir, los astros siguen su camino como siempre lo han hecho, siguiendo leyes fijas e inmutables, mientras que sobre este planeta hubo y hay todavía una enorme efervescencia y una continua producción de novedades biológicas más o menos llamativas.

Se trata de un juego muy sutil. La biología es una ciencia histórica porque su desarrollo es el resultado de una serie de estímulos y contraestímulos casuales que pueden llevar a resultados diferentes: en tal caso específico se confirmó una cierta novedad biológica y no otra, o en una línea de descendencia dada no se produjo ninguna novedad. La vida ha tomado muchos de sus rumbos porque ha sido empujada accidentalmente en esa dirección, pero en muchos casos habría podido tomar otros rumbos diferentes. Esto no significa, sin embargo, que, una vez emprendidos, ciertos caminos no se hayan vuelto obligatorios y necesarios. La célula habría podido producir su energía a través de una serie de reacciones en lugar de otras, pero una vez determinadas, ¡cuidado si no se utilizan esas reacciones específicas! Es decir, muchas elecciones podrían haber sido diferentes, pero una vez afirmadas, se volvieron obligatorias. De este modo la contingencia se transforma en férrea ley, y la casualidad se vuelve necesidad, y necesidad imperiosa, gracias a uno de

esos milagros que sólo la naturaleza logra realizar a lo largo del tiempo. La casualidad propone y a veces dispone, pero a partir de ese momento todo avanza como si ese fenómeno determinado estuviera regido por leyes inviolables. Así es la irreversibilidad de los eventos que han forjado la historia de la vida. Hablaremos de esto más adelante.

Existe además otra propiedad que parece exclusiva de algunos seres vivientes: la individualidad. Para nosotros, los seres humanos, la individualidad es una prerrogativa sumamente importante, a la que nos aferramos con ahínco. Sabemos bien qué es y tenemos con ella una gran familiaridad y una relación cotidiana. En la naturaleza, sin embargo, no existe semejante abundancia de individualidades y de identidades. Al contrario, basta con considerar que en el mundo de las partículas subatómicas la identidad no existe, ni activa ni pasiva, ni siquiera en teoría: cada electrón es igual a otro y no puede diferenciarse uno de otro de ningún modo, y esto vale también para los protones y los fotones. Muchas moléculas están juntas precisamente gracias a esta propiedad de los electrones y de las demás partículas subatómicas. Lo mismo puede decirse de muchos átomos y pequeñas

moléculas. Sólo cuando se llega a las moléculas más grandes puede alcanzarse un germen de individualidad, obviamente pasiva, es decir, puede existir un ser viviente que las distinga y las individualice. Así, una piedra o un peñasco pueden distinguirse uno de otro si hay un ser viviente en condiciones de hacerlo e interesado en ello.

Un organismo unicelular o cada una de las células de un organismo pluricelular se encuentran en el límite de esta posibilidad de ser distinguidos: no es fácil diferenciarlos de otros. Sin embargo, es posible hacerlo si existe un ser viviente interesado en hacerlo. Más fácil resulta, sin duda, distinguir un organismo pluricelular aunque sea minúsculo, pero se trata en todos los casos de ejemplos de individualización potencial pasiva. Solamente con los grandes animales y con el hombres se llega al fin a una individualidad activa: un perro en particular puede ser identificado y él, a su vez, puede identificar reconociendo, por ejemplo, a sus patrones –y también a sus "enemigos"– aunque para poner de relieve esta capacidad es necesario basarse en evidencias indirectas. Finalmente, un ser humano sabe que posee esta capacidad, está en condiciones de comunicarlo y puede incluso asignar nombres a los demás individuos. Esta es en apretada

síntesis la historia natural de la individualidad en el mundo, desde las partículas subatómicas hasta el hombre, es decir, la historia natural del ser.

El conjunto de todas las características de la vida que hemos enumerado hasta este momento también puede resumirse, si quisiéramos, en el término autonomía. Los seres vivientes parecen tener un alto grado de autonomía, aunque limitada en el tiempo. Mientras vive, en efecto, un organismo parece seguir sus propias leyes y finalidades. Recordemos que, en su momento, Aristóteles resumió todo esto en el término entelequia, una entidad que estaría, según su punto de vista, en la base de la especificidad de la vida misma. Entelequia, *entelékheia* en griego, significa "lo que tiene en sí su propia finalidad" y, por lo tanto, su propia autonomía. Es evidente, sin embargo, que esa autonomía desaparece bruscamente cuando el organismo muere.

Este inventario de las características de los seres vivientes que hemos venido enumerando es interesante para la comprensión de la vida, pero también para encuadrar aquello que no está vivo. Incurriendo en un grave error de perspectiva, por instinto atribuimos algunas de las propiedades mencionadas también a

la materia inanimada. Probablemente esto se debe a que vivimos desde siempre inmersos en lo viviente y por completo rodeados de sus manifestaciones. Por lo tanto llegamos a considerar general también aquello que no lo es. Tendemos a pensar, por ejemplo, que la posesión de funciones e intenciones es una propiedad universal de las cosas, por no hablar de la individualidad, y nos inclinamos a pensar que todo tiene una finalidad y un objetivo, un error en el que han caído incluso los más grandes filósofos. Cuando, por ejemplo, Aristóteles postula que la sustancia del mundo se articula en materia y forma, hace extensivo al mundo en general algo que ha observado correctamente en los seres vivientes. Es posible distinguir una materia y una forma en su cuerpo y en su manera de vivir a lo largo del tiempo del mismo modo que en una mesa o en una silla que son obra de seres vivientes, pero no en el mundo inanimado, por cierto. Y sería posible continuar con las causas primeras y los motores inmóviles.

Verdaderos maestros en este sentido fueron los representantes de las culturas primitivas, propensos todos a una visión animista de la realidad, pero las estridentes contradicciones generadas por esta convicción se proyectan incluso en nuestro mundo actual, lleno de preconceptos acríticos. La vida es, en suma,

un componente fundamental del mundo, pero no lo es todo. Todo esto, repito, es esencial para comprender la vida y también la no-vida.

Adentrémonos ahora un poco más en la profundidad de los seres vivientes para observar otra característica cuya importancia no es fácil de medir, pero que no conoce excepciones: desde el punto de vista químico, los seres vivientes están constituidos por moléculas especiales que nosotros llamamos orgánicas, contraponiéndolas a las inorgánicas.

Se trata de compuestos centrados en el carbono y que contienen en su mayoría oxígeno, hidrógeno y nitrógeno. Pueden encontrarse también otros átomos, y un cierto número de elementos adicionales presentes en bajas concentraciones, pero la vida en su mayor parte tiene una composición química de base más bien simple y uniforme. Se ha discutido mucho en el pasado si podía existir la vida sin el carbono, pero hasta ahora no ha surgido una respuesta clara y esta probablemente deba ser postergada hasta el momento en que se encuentren en el futuro (si es que eso alguna vez sucede) otras formas de vida diferentes de la terrestre. Veremos más adelante, de todos modos, que los numerosos compuestos del carbón presentan propiedades que resultan

de gran ayuda en la administración particularmente mesurada que hace la vida de sus recursos energéticos.

En realidad, la constatación del hecho de que la vida tiene una composición química singular no ha hecho más que reforzar a su vez la convicción de que se trata de una realidad aparte respecto del resto de la creación. Que tal convicción carece de un fundamento sólido lo sabemos sin embargo desde hace casi dos siglos, es decir, desde que el alemán Friedrich Wöhler realizó en 1828 la primera síntesis química de la urea. La urea es una pequeña molécula orgánica que se encuentra tan solo en los seres vivientes. El hecho de que uniendo carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno se haya logrado sintetizar una cierta cantidad de urea idéntica a la que se encuentra en la naturaleza representó la primera demostración de que la materia orgánica no tiene nada de misterioso. Después de este primer episodio, la historia de las síntesis químicas de sustancias orgánicas ya no se detuvo y hoy podemos afirmar que no existe ningún compuesto orgánico que no sea sintetizable en laboratorio. Nació así una verdadera química de la vida que llevó a la producción y al uso de las moléculas orgánicas más dispares, desde la insulina hasta la hormona del crecimiento y cadenas cada vez más extensas de ADN.

Más recientemente se logró reconocer que, además de ser moléculas orgánicas, los componentes más importantes de la vida, desde el ADN hasta las proteínas, son macromoléculas, es decir, moléculas muy largas, que consisten en la repetición de componentes elementales eslabonados entre sí en una cadena lineal. El ADN es una cadena compuesta por cuatro componentes fundamentales llamados nucleótidos (A, G, C, T), repetidos una gran cantidad de veces. Las proteínas están constituidas por la repetición de componentes químicos fundamentales, llamados aminoácidos, y pertenecientes a veinte familias diferentes. Incluso algunos azúcares y algunos ácidos grasos pueden presentarse bajo la forma de macromoléculas, pero su rol en las dinámicas celulares es muy inferior al del ADN y el de las proteínas.

¿Por qué insistir en la presencia de macromoléculas en la dinámica de la vida? Por varias buenas razones, de naturaleza estructural y funcional. En primer lugar, con los mismos componentes puestos en un cierto orden en vez de otro pueden formarse una enorme cantidad de moléculas diferentes. Tomemos por ejemplo las proteínas, que constituyen el cuerpo y el alma de todos los seres vivientes. Con los veinte aminoácidos diferentes combinados entre sí de diferentes

maneras y dentro de cadenas ni siquiera demasiado extensas, puede construirse una infinidad de proteínas diferentes, con propiedades diferentes, y en condiciones de desempeñar funciones diferentes. Una cadena proteica compuesta tan sólo de veintiún elementos puede llegar a dar un resultado de 21 elevado a la veintésima potencia de composiciones diferentes: un número de treinta cifras, es decir ¡miles y miles de millones! La cifra aumenta considerablemente si se toma en consideración el hecho de que cada cadena proteica puede replegarse y envolverse sobre sí misma de un modo absolutamente peculiar y que puede asimismo combinarse productivamente con otras cadenas proteicas. Se obtiene así una gran variedad y por lo tanto un amplio espectro de especificidades, con relativamente poco esfuerzo.

En segundo lugar, una macromolécula puede ser ser leída en todos los sentidos como una frase y desempeñar, por ende, el rol de transportar información. Las frases de nuestro lenguaje consisten en una sucesión ordenada de letras del alfabeto, y es evidente que con este simple procedimiento puede producirse prácticamente un número infinito de frases, cada una con un significado propio que deriva esencialmente del orden en que están dispuestas las letras: "gato"

es diferente de "gota", aun cuando las letras sean las mismas. Así, en el lenguaje del ADN, la secuencia TATAT es diferente de TAATT, aunque conste de los mismos nucleótidos. Y es precisamente por el rol de transmitir información de ADN que esta propiedad es fundamental, ya que confiere a esa molécula la capacidad de transportar las instrucciones biológicas. La molécula de ADN tiene un rol estructural y un rol funcional, como todas las moléculas, pero la historia de la vida la ha favorecido y le ha asignado, además, otra función, de codificación de la información biológica. La historia de la vida ha permitido, además, la convergencia de las dos motivaciones mencionadas: la información provista por el ADN sirve para unir del modo correcto las diferentes cadenas proteicas.

La sucesión lineal de los aminoácidos que componen una proteína dada está determinada, en efecto, aminoácido por aminoácido, por la secuencia nucleótidica del ADN del gen correspondiente. Al ser lineal uno y lineal la otra, hay una verdadera correspondencia entre la secuencia del gen y la de la proteína a la que este codifica.

Esto es posible gracias a una simple propiedad del mensaje genético: cada triplete de nucleótidos contiguos presentes en el gen determina un aminoácido específico. A la terna de nucleótidos ATG, por ejemplo,

le corresponde el aminoácido metionina, a la terna CCC, la prolina. Trescientos nucleótidos determinan una secuencia de cien aminoácidos; novecientos nucleótidos determinan una cadena de trescientos aminoácidos, que suele ser, en general, la longitud promedio de una proteína.

El cuadro de 64 casilleros que establece la correspondencia entre cada triplete de nucleótidos y un determinado aminoácido se denomina código genético, a pesar de que en la vida cotidiana se utiliza este término para designar al mensaje genético completo, o genoma, de un individuo.

El lector atento se preguntará cómo es posible hacer corresponder 64 tripletes con 20 aminoácidos. El misterio se resuelve pronto: cada triplete determina a un único aminoácido, pero el mismo aminoácido puede ser determinado por más de un triplete. La metionina y el triptófano, por ejemplo, están determinados por un único triplete cada uno, pero la serina está determinada por seis tripletes diferentes, y la prolina, por cuatro. Esta particularidad del código genético no produce ninguna confusión ni ambigüedad, antes bien, protege la composición de las proteínas de cierto número de errores: si por error el triplete CCC se transforma en el triplete CCA, no

sucede nada malo porque ambos tripletes determinan al mismo aminoácido, es decir, la prolina.

Además, la linealidad de las proteínas es esencial para su síntesis, un proceso en el que no puede haber errores. Si observamos el ADN, no podemos dejar de notar que, gracias a su estructura lineal y repetitiva, esta macromolécula puede transportar un verdadero mensaje del mismo modo que cualquier texto literario. En su conjunto, el ADN contenido en la célula resulta ser en los hechos un gigantesco texto que transmite un gran número de mensajes sucesivos.

En cada molécula química es fundamental la composición atómica; en las macromoléculas, más que la composición lo que cuenta es el orden de los componentes elementales que las constituyen. Es decir, más allá de la composición química, entra en juego, aquí, un componente exquisitamente informacional: el ADN funciona y transmite información al mismo tiempo.

Además, los seres vivos están invariablemente constituidos por células, una o más de una. La naturaleza celular es uno de los ejes de la vida. Existen muchísimas estructuras biológicas por encima y por debajo del nivel de la célula, pero es la célula la que representa el elemento constitutivo esencial de la vida, la piedra angular del universo viviente: la célula

nace, crece, es capaz de cumplir las funciones vitales esenciales y se reproduce.

No sabemos si esto es así de un modo necesario o si ha sido el efecto de una entre las tantas combinaciones exitosas posibles. La cuestión, como muchas otras del mismo tipo, se plantea justamente a causa de la naturaleza histórica y contingente de las cosas de la vida. Por lo general tendemos a pensar que las soluciones que observamos son las únicas posibles o las mejores, pero debemos admitir que de ningún modo está dicho que sea así. Lo único que se puede hacer es esperar la oportunidad de observar otras formas de vida, si es que existen. Suelo decir bromeando que el mayor experimento de biología de la historia tendría lugar si se encontrara en algún sitio una forma de vida alternativa a la vida terrestre y si existiera la posibilidad de compararla con lo que ya conocemos. De ese modo, algunas de las cuestiones biológicas más apremiantes podrían encontrar una respuesta. Por ahora, y quién sabe aún por cuánto tiempo, deberemos conformarnos con hipótesis y conjeturas, porque ese experimento no está a la vista.

No obstante, nada nos impide tratar de comprender, tomando como punto de partida las condiciones presentes actualmente sobre la Tierra. Desde este

punto de vista, la naturaleza celular de la vida se presenta como una solución muy acertada. Este hallazgo endulza, por decirlo de algún modo, la aspereza del paso de la materia inanimada a la vida, dividiéndola en al menos dos fases diferentes: la invención de la célula y la construcción de un organismo pluricelular. La ventaja debería ser más que evidente. Organizar la estructura y la función de los diferentes componentes de un organismo complejo –todo de una vez– parece una empresa excepcionalmente ardua, mientras que organizar los componentes biológicos en una célula y luego coordinar las diferentes células entre sí parecería ser una tarea más sencilla, no solamente al inicio de los tiempos, sino también ahora. Construir y controlar un campo de regularidades como el celular nos parece sustancialmente algo factible, así como lo es reunir y controlar las diferentes células de un organismo. La estructura celular es un modo muy eficaz de proponer y promover la naturaleza modular de la vida.

Finalmente, al menos en este planeta la vida está asociada a un campo definido y restringido de temperaturas, ni demasiado altas ni demasiado bajas, y mejor aún si son relativamente estables. La vida prospera alrededor de los 37ºC y no tolera temperaturas demasiado alejadas de este promedio. Conviene

recordarlo porque esta parece ser una condición muy estricta para el desarrollo y la perpetuación de la vida. No puede haber vida a 300ºC o a 100ºC bajo cero.

En el pasado, el conjunto de las propiedades de los seres vivientes ha generado en nosotros una profunda curiosidad, y aún hoy nos llena de curiosidad. A esto hay que agregar el hecho de que, en el cosmos, la vida parece ser más una excepción que la regla. Cuando pensábamos que nuestro planeta era el centro del cosmos, la vida parecía una realidad ineluctable y necesaria. Luego nos dimos cuenta de que nuestra Tierra no era en absoluto el centro del universo sino que representa tan sólo uno de los planetas que giran alrededor de una de las tantas estrellas existentes. Una mirada en derredor nos ha revelado, además, que la existencia de formas vivientes no se halla muy difundida, al menos en las cercanías. De ningún modo puede excluirse que exista alguna forma de vida en un planeta de alguna remota estrella, pero por el momento no tenemos ninguna noticia de algo semejante. Esto aumenta aún más la fascinación y el interés por el fenómeno de la vida, que se presenta así en toda su especificidad e incluso unicidad.

Pero aún hay más. Con respecto a la vida, hay un problema que en el pasado adoptó la forma de una

paradoja. Gracias a la física sabemos que en el universo todo tiende inexorablemente al desorden y a la pérdida de organización. Lo dice de modo explícito el segundo principio de la termodinámica, un precepto universal que no admite excepciones. En un sistema aislado –y es muy probable que el universo lo sea–, las cosas tienden invariablemente hacia la degeneración y el desorden con un aumento concomitante de la entropía, el indicador fundamental de la ausencia de orden y de organización interna.

Los efectos de este principio pueden observarse incluso en nuestra vida cotidiana. El calor pasa en forma espontánea de un cuerpo caliente a uno más frío, y nunca en sentido contrario; dos gases o dos líquidos se mezclan sin problemas, mientras que luego es muy difícil volver a separar sus componentes iniciales; la energía contenida en la leña que se quema se difunde espontáneamente como calor, pero este jamás va a reconstituir el material que sirvió como punto de partida. En otros términos: los procesos físicos son irreversibles, es decir, a lo largo del tiempo avanzan en una sola dirección, del orden al desorden.

Y sin embargo, la vida que conocemos es esencialmente orden, es decir, organización y control. Dentro del ser viviente reina un orden que le permite

mantener su estructura de conjunto por largo tiempo, o incluso generar una nueva si en alguna ocasión fuera necesario. Si introducimos una sola célula bacteriana en un medio de cultivo, esta se multiplicará sin medida: primero dos células, luego cuatro, después ocho, y más y más hasta alcanzar cifras de millares y millares. Primero había un solo organismo, luego, muchísimos.

¿Cómo se concilian, entonces, estas dos observaciones? Si todo avanza inexorablemente hacia el desorden, ¿cómo hace la vida para existir, que intrínsecamente es producción y mantenimiento del orden interno? Parece que hubiera algo que no encaja, como si a los seres vivos se les permitiera violar el segundo principio de la termodinámica. Pero no es así, como quedó demostrado de modo irrefutable a mediados del siglo pasado.

La solución de la paradoja es bastante simple y lleva a la conclusión de que la vida no tiene nada de particular, sino que sus fenómenos se ajustan perfectamente a los principios del resto del mundo. Puede demostrarse, en efecto, que la producción de orden por parte de un ser viviente queda suficientemente equilibrada por el simultáneo aumento del desorden en el medio ambiente. En otros términos, la suma del orden que se produce dentro de un ser viviente y

del orden disipado al mismo tiempo en el medio que lo rodea revela que, en conjunto, no se ganó sino que se perdió orden. Lo mismo puede expresarse de otro modo: un ser viviente no es un sistema cerrado sino abierto. En consecuencia, puede ser objeto de transformaciones que generan orden, pero a costa del orden de su medio circundante. Lo que cuenta es que el sistema cerrado constituido por el ser viviente y su ambiente pone en evidencia la existencia de procesos que siguen la regla general. Por lo tanto, la vida no viola ningún principio físico fundamental; sus procesos forman parte, perfectamente, del cuadro general de las leyes que rigen el universo.

Podrá advertirse que buena parte de las argumentaciones de este libro concuerdan con un punto de vista, o un programa, reduccionista, no muy popular en Italia, y que incluso, con frecuencia, ha generado controversia. Existen al menos dos formas de reduccionismo. El reduccionismo "débil", o "metodológico", se limita a sostener que lo más conveniente es explicar las cosas nuevas que van descubriéndose en términos de lo que ya se conoce. El reduccionismo "fuerte", empleado hoy especialmente en el estudio de cuestiones biológicas, sostiene que muchas propiedades específicas

de un cierto plano de la realidad pueden explicarse mejor sobre la base del conocimiento de lo que "está por debajo". El caso característico es que la vida puede explicarse en términos de átomos y moléculas.

No me abocaré aquí a defender este punto de vista, común a todo científico, sino que me limitaré a aclarar que el programa reduccionista no es en absoluto incompatible con lo que con frecuencia se denomina "emergentismo", visión según la cual remontándose a planos superiores de la realidad siempre aparecen nuevas propiedades, precisamente las "propiedades emergentes". Por ejemplo, el agua es húmeda y transparente, aun cuando las moléculas de H_2O que la componen no lo son; o la célula está viva aunque sus organelas no lo estén; o, como último ejemplo, el cerebro piensa aunque sus células no sepan hacerlo. A mi modo de ver, el reduccionismo tiene sentido justamente porque en los niveles superiores existen propiedades emergentes. De otro modo no habría ninguna necesidad de él: todo sería claro por sí mismo. Sin embargo, es insensato negar la existencia de propiedades emergentes, sobre todo en el mundo de la vida.

Todas estas consideraciones contribuyen a hacer de este un campo de estudio de sumo interés. Hoy en día la ciencia ya no adopta explicaciones mágicas

o principios trascendentes, pero eso no cambia en absoluto la extraordinaria fascinación que producen los fenómenos naturales, cuya marcha no puede sino llenarnos de asombro y de respetuoso estupor. Cuando se la llega a conocer, la realidad efectiva es siempre mucho más rica e interesante que cualquier relato mitológico del pasado o del presente. E investigarla representa una aventura sin parangón.

2. Una primera definición

¿Es posible definir la vida? Una primera definición podría ser esta: "un ser viviente se identifica con cierta cantidad de materia organizada, limitada en el tiempo y en el espacio, y en condiciones de metabolizar, reproducirse y evolucionar".

No se trata de una definición simple, como tal vez habría podido suponerse. Tan sólo hemos logrado enumerar un cierto número de características que definen en conjunto a un ser viviente. Analicémoslas una por una.

Lo primero que hemos dicho es que un ser viviente está constituido por materia organizada. Esta afirmación, aunque clarísima, deja un sabor amargo porque presupone el concepto de organización, es decir, de disposición ordenada de partes en movimiento, que representa justamente una de las características específicas de la materia viviente. La palabra organización, que etimológicamente viene de *órganon,* que quiere decir instrumento, indica una propiedad que sólo

puede existir en los seres vivos, por dentro o por fuera de ellos. Quienquiera que observe la vida, incluso en sus formas más simples, no puede dejar de notar que donde quiera que esta se manifieste, ninguna de sus partes y, en definitiva, de sus moléculas, está dispuesta de un modo azaroso ni se mueve arbitrariamente. Cualquier otra realidad que no sea viviente puede tener una conformación propia y mostrar signos de orden, incluso de gran orden –como en el caso de los cristales–, pero se trata de un orden estático, establecido de una vez y para siempre, y destinado por lo general únicamente a consumirse sin regenerarse.

Estar vivo, en cambio, significa estar siempre dispuesto a cumplir una serie de acciones. Las diferentes partes de un ser viviente no obedecen a la rígida simetría de un cristal ni se disponen pasivamente según un gradiente, es decir, una distribución decreciente determinada punto por punto por las leyes de la física y de la química, como sucede con muchas moléculas inorgánicas. Se trata, más bien, de una especie de equilibrio dinámico. Más precisamente, mientras hay vida, se encuentran cercanas las cosas que tienen que estar cerca, y alejadas las que deben estar lejos.

Decir materia organizada en el marco de una definición de la vida constituye, por lo tanto, una suerte

de petición de principios: se da por descontado, en definitiva, lo que debería ser explicado. Tal vez en el futuro podrá hallarse un término más analítico y específico que el de materia organizada, pero por el momento esto es lo mejor que puede hacerse.

La definición dice en primer lugar que un ser viviente está hecho de materia y, además, que no puede tratarse de una porción de materia cualquiera sino que debe presentarse organizada, y queda claro que la materia viviente se organiza de un cierto modo a expensas de una determinada cantidad de energía, y no puede permanecer estable sin un gasto continuo de energía.

Si tomo en consideración una célula viviente de cualquier tipo, puedo observar, por ejemplo, que la concentración de iones, sobre todo sodio y potasio, no es igual dentro y fuera de la célula. La célula tiende a tener en su interior más potasio y menos sodio que en el exterior, porque "bombea" continuamente al potasio hacia adentro y al sodio hacia afuera, utilizando cierta cantidad de energía.

Es un fenómeno que se observa muy bien en el axón de una célula nerviosa. Aun cuando no esté conduciendo ningún impulso nervioso, la neurona está viva si muestra una diferencia de concentración iónica entre el interior y el exterior. Si no fuera así, no serviría de

nada ya que el impulso nervioso no podría generarse y propagarse. Si yo mato la célula, después de algunos instantes la concentración de iones sodio y potasio pasa a ser idéntica adentro y afuera porque en la naturaleza las cosas tienden al equilibrio. Estar vivo, aun sin estar en acción, quiere decir, antes que nada, estar dispuestos a reaccionar, dándose una cierta organización.

Además, se ha dicho que la materia viviente es por necesidad limitada en el tiempo y en el espacio. Veamos en primer lugar la cuestión del espacio. Los seres vivientes no pueden tener una dimensión cualquiera, aunque esta se extienda en realidad a lo largo de al menos ocho órdenes de tamaño, desde algunas décimas de micrón hasta varias decenas de metros. Los organismos no pueden ser ni demasiado pequeños ni demasiado grandes, y esto vale también para sus células.

¿Por qué una célula no puede ser demasiado pequeña? Todo lo que cuenta en su interior está a cargo de un cierto número de moléculas, porque la vida se produce y se mantiene sobre todo a nivel molecular. Las moléculas, de cualquier índole que sean, por sí solas, no tienen un comportamiento regular y previsible: no son estrictamente controlables y por tanto no pueden encarnar ningún orden, y menos aún una estabilidad.

Para poder lograrlo, es necesario contar con un número de moléculas que en conjunto puedan seguir un orden y una tendencia. Y estamos hablando de un número alto, millones y millones, porque pocas moléculas están siempre sujetas a fluctuaciones estadísticas. La magnitud de las fluctuaciones disminuye al aumentar el número de las moléculas implicadas, por lo que al aumentar considerablemente su número se pasa de un comportamiento estadístico a uno determinista. Cada organela celular y, con más razón, cada célula tiene que poder contener un número suficientemente grande de moléculas si no quiere quedar atrapada en un comportamiento caótico.

Es un hecho que la vida se asoma al límite de diversos umbrales. El primero y fundamental es el que separa las entidades pequeñísimas que obedecen a las leyes de la física cuántica, de las de dimensiones apenas suficientes como para comportarse según los principios de la física clásica. La vida surge y prospera justamente un paso más allá de este límite; es decir, de hecho no puede operar si no es a través de moléculas cuya identidad y estabilidad están garantizadas por las leyes de la mecánica cuántica. Al menos hasta cierto límite, cada una de ellas es lo que es gracias a la "granularidad" que la materia muestra a este nivel.

¡Imaginemos lo que sucedería si chocando entre ellas las moléculas orgánicas se desmenuzasen, por decirlo de algún modo, y perdiesen continuamente sus bordes! El orden biológico sería una quimera. Esto no sucede porque, a pesar de todo, dentro de ciertos límites las moléculas mantienen su propia identidad. Por su naturaleza los objetos cuánticos, o cambian todo de una vez, o no cambian en absoluto.

El segundo umbral está representado, en cambio, por la confiabilidad del comportamiento de un cierto número de moléculas. La vida se encuentra, en efecto, un paso más allá del límite de la no confiabilidad de las pequeñas cantidades de átomos y moléculas. Por ese motivo, tiene que contener siempre una cierta cantidad mínima de unos y otras.

Pero ¿por qué la célula está obligada a operar tan desde abajo, es decir, con estructuras tan pequeñas que la ubican al límite de lo imposible? Es porque la posición, el movimiento y la acción de las diferentes moléculas tienen que poder ser regulados globalmente y en tiempo real. Esto les impone límites superiores a las dimensiones de una célula. Entre sus diferentes partes tiene que haber siempre una cierta correspondencia o correlación, a veces llamada coherencia. Y en la naturaleza, los ámbitos de coherencia espacial y temporal no

pueden ser nunca demasiado extensos. Las células, por lo tanto, deben ser lo suficientemente grandes como para contener un número aceptable de moléculas, pero lo bastante pequeñas como para que sea posible controlar su comportamiento global sin demasiados retrasos ni ambigüedades.

A la vez, un organismo compuesto por un gran número de células no puede ser tan grande como para ocasionar problemas de comunicación entre sus diferentes partes o para hacer que se desmorone bajo su propio peso. Este límite superior implica además otra restricción para las dimensiones de sus células. En efecto, un organismo debe poder contar con un alto número de células, sobre todo si posee un sistema nervioso cuyo funcionamiento se basa en la interacción de una gran cantidad de componentes. Si las células fueran más grandes, no existirían animales inteligentes y tal vez ni siquiera coordinados. Las células de un organismo, entonces, tienen que ser muy numerosas y lo suficientemente pequeñas, aunque no al punto de no poder funcionar.

Los seres vivientes, además, están limitados en el tiempo. No hay ningún ser viviente que no tenga un tiempo limitado delante de sí: todo lo que nace, más tarde o más temprano, tiene que morir. "Todo lo que

vive debe morir, pasando, a través de la naturaleza, a la eternidad", para decirlo con el Shakespeare de *Hamlet.*

¿Por qué? En el fondo ya lo hemos dicho. La vida, con su organización, se comporta de modo diferente a los seres inanimados: estos no pueden hacer más que seguir el segundo principio de la termodinámica, el cual sostiene que de por sí el orden disminuye siempre, mientras que el desorden, del que la entropía es una medida, aumenta continuamente. Los seres vivientes, con su temporaria producción de orden no constituyen verdaderas excepciones a las leyes de la física, sino que son una especie de recinto, de tierra franca en la que hay una inversión localizada y temporaria con respecto al resto del mundo: mientras están vivos, se crea y se mantiene una cierta cantidad de orden. El ser viviente tiene que ser limitado en el tiempo ya que en su interior tienen lugar fenómenos que ponen transitoriamente en suspenso las leyes que gobiernan los procesos del resto del universo.

Utilizando una metáfora un tanto osada, a cada ser viviente, en el momento de nacer, se le asigna un "patrimonio" de orden para gastar. Puede durar días, meses o años, pero cuando ese orden se agota, se agota de modo irreversible. Naturalmente, nada de esto sucede en verdad, pero el significado de la comparación

es claro: cada ser viviente puede vivir sobre la base de la suspensión de los principios generales de la física sólo por un cierto lapso de tiempo, que puede incluso ser significativo, pero al final debe acomodarse a sus límites y convertirse nuevamente en materia inanimada. Para ciertos microorganismos ese período es brevísimo, pero para muchos otros animales superiores no es corto en absoluto. Todo el juego de la vida y todo lo que venimos diciendo en este libro se refiere a lo que sucede durante ese período.

Otra metáfora, un poco más realista, podría ser la siguiente. Al nacer, cada organismo es empujado a lo alto de una pendiente, de la cual luego sólo puede deslizarse hacia abajo. Al llegar abajo, al nivel cero, el juego termina, pero todo depende de hasta qué altura hemos sido lanzados al inicio y con qué velocidad descendemos la pendiente. Partir de una gran altura y bajar muy lentamente significa tener una vida larga; por el contrario, partir de una altura media y descender a gran velocidad significa tener una vida breve. En realidad, la mayor parte del juego consiste en descender lo más lentamente posible a lo largo de la pendiente de la vida.

Queda claro que la altura en la cual uno se encuentra en cada momento corresponde a la "energía útil"

que hemos acumulado dentro de nosotros: empleo este término para hacerme entender, pero el término técnico es, como veremos, "energía libre", la cual debe ser utilizada con gran precaución. Buena parte de los mecanismos de la vida tiene como objetivo conservar durante el mayor tiempo posible la energía libre disponible. En el fondo, esta es la esencia del fenómeno vida. Ahora que nosotros, los habitantes de los países más desarrollados, vivimos en promedio el doble que hace cien años, ¿qué es lo que ha cambiado en este proceso? La velocidad con la que se desciende esa pendiente, hablando siempre, obviamente, de valores promedio.

Por lo tanto, morir hay que morirse, y envejecer también, pero existe una gran cantidad de variantes con respecto a este tema. La cantidad y la multiplicidad de estas variaciones son tales que fácilmente puede perderse de vista su hilo conductor, pero el tema evidentemente siempre es el mismo y se refiere siempre al mismo equilibrio de conjunto. Una mirada a la duración de la vida de los diferentes organismos sugiere una correlación positiva con sus dimensiones, lo que no es tan fácil de entender, y con la duración del período de desarrollo. Podría decirse que en un organismo más grande, que tiene un período de

desarrollo más extenso, se ha hecho una inversión biológica mayor, y esto podría tal vez explicar la mayor duración promedio de su existencia.

Pasemos ahora a considerar la exigencia de tener un metabolismo. El metabolismo es ese conjunto de procesos que, a expensas de una cierta cantidad de materia y de energía, reúne y mantiene en funcionamiento todas las estructuras biológicas de un organismo, desde las organelas celulares hasta el cuerpo entero. Los organismos llevan a cabo todo esto asimilando sustancias del exterior, modificándolas y estructurándolas para sus propios objetivos y expulsando, finalmente, el producto de desecho.

Una de las características más interesantes de un organismo pluricelular es su capacidad de conservar un equilibrio interno, manteniendo constante, en la medida de lo posible, un cierto número de características internas, independientemente de las variaciones externas. La constancia del ambiente interno, llamada también homeostasis, constituye uno de los rasgos más significativos y distintivos de los organismos vivientes. La cantidad de oxígeno o de azúcares presente en la sangre, la fluidez misma del líquido circulante, su acidez, su salinidad, hasta la concentración de iones

de los varios elementos presentes en cada una de las células son magnitudes físico-químicas que permanecen constantes, dentro de lo posible, mediante mecanismos microscópicos y macroscópicos de control y de mantenimiento.

Si en la sangre hay demasiada azúcar se activan mecanismos que aceleran su utilización por parte de las células de todo el organismo. Si en cambio esta no resulta suficiente, otros mecanismos hacen de modo tal que disminuya su consumo por parte de las células y que se libere más azúcar en la sangre. Si la presión de la sangre está demasiado alta, se la hace descender. Si es demasiado baja, se interviene para hacerla subir de nuevo. Todos estos mecanismos se denominan, en general, homeostáticos, porque contribuyen a mantener la homeostasis, la sorprendente constancia de los valores de los parámetros físico-químicos del medio interno.

Parte integrante del proceso metabólico es también la disponibilidad de cierta cantidad de energía inmediatamente utilizable por las diferentes partes del cuerpo. La energía asimilada sirve para mantenernos vivos y para cumplir funciones esenciales, pero también para realizar acciones macroscópicas; si fuera de otro modo, no nos moveríamos y no podríamos hacer nada.

La energía, es sabido, no se crea ni se destruye; sólo puede transformarse. Este es justamente el rol primario del metabolismo: transformar la energía tomada del ambiente circundante y utilizarla para edificar las estructuras biológicas del organismo haciéndolas funcionar.

Para mantenerse vivo, el ser viviente tiene necesidad de energía, es decir, requiere un metabolismo energético. El término metabolismo indica, por lo tanto, en primer lugar, la capacidad de los seres vivos de cumplir muchas funciones gastando una cierta cantidad de energía. Energía es un término del que actualmente se habla con frecuencia, con los más variados significados; pero el término posee un significado científico específico: consiste en la capacidad de realizar un trabajo. Sin energía no se realizan acciones ni se mantiene nada organizado. Los seres vivientes tienen necesidad de gastar energía para mantenerse vivos. Pueden hacerlo a través de un conjunto de procesos de degradación y síntesis que han sido en buena medida explicados en los últimos doscientos años pero que aún esperan nuevas aclaraciones.

A veces se considera que poseer un metabolismo es el único requisito fundamental de un ser viviente.

Evidentemente esto no tiene sentido porque el concepto toma en cuenta sólo un período de tiempo limitado, el de la vida de un organismo. Los seres vivos, en cambio, deben reproducirse porque tienen una vida limitada y si no se reprodujeran, después de un tiempo, todo acabaría. Desde la antigüedad una de las cosas que más impacta a quien observa a los seres animados es justamente su capacidad de reproducirse, en uno o más organismos casi idénticos. Un niño tendrá sin duda dos brazos, dos piernas, dos ojos, una nariz, una boca y de inmediato será reconocible como un ser humano, del mismo modo que el hijo de dos cocodrilos se reconoce enseguida como cocodrilo, y que el brote de una mimosa se reconoce al punto como mimosa.

En la base del árbol de la vida las especies tienden a reproducirse en soledad y de manera autónoma: en un determinado momento un organismo genera otro, sin ninguna otra intervención externa. En la inmensa mayoría de los organismos, en cambio, se ha establecido esa forma de reproducción que se denomina sexual, y cada población tiene que contener al menos dos tipos de individuos, más o menos diferentes, los machos y las hembras. Los hijos nacen de la unión de dos organismos, ya no de uno solo. Cada progenitor pone a disposición un tipo especial de células cuya

finalidad exclusiva es la reproducción, que son los gametos. La unión de los gametos de los padres de los dos sexos produce un nuevo organismo.

Numerosos organismos tienen por lo general una reproducción sexual, mientras que otros recurren a ella sólo en circunstancias particulares: tienen también la capacidad de reproducirse en forma asexual, pero cada tanto recurren a este tipo de generación, habitualmente cuando encuentran dificultades: demasiado calor, demasiado frío, carencia de recursos en general y de agua en particular. Todo eso parece indicar que la reproducción sexual conlleva algunas ventajas. Y en efecto es así: mezclando los gametos de dos individuos diferentes, que aportarán presumiblemente dos genomas ligeramente distintos, se incrementa la variabilidad de los organismos hijos.

El hecho de aumentar la variabilidad de los componentes de una población ofrece mayores posibilidades de supervivencia, aun en condiciones difíciles. Con la reproducción sexual se produce una nueva combinación de las cartas genéticas y una mayor provisión de caracteres biológicos. No sabemos con certeza si este es el único factor que favoreció la aparición y la difusión de la reproducción sexual, pero sin duda esta no es una ventaja menor.

La gran importancia que la naturaleza le asigna a la reproducción sexual queda confirmada, además, por la increíble variedad de "estrategias" que pone en acción en cada especie para favorecer el encuentro y el acoplamiento de los individuos de los dos sexos. A tal punto que junto al concepto normal de evolución por selección natural Darwin propuso también el de evolución por selección sexual. El juego, en este caso, queda librado a la preferencia que los animales de un sexo pueden sentir por algunos individuos del otro sexo más que por otros.

La invención del sexo y de la reproducción sexual fue un evento capital en la historia de la vida. Desde el punto de vista de la economía de conjunto de la naturaleza, esto parecería en cierto modo un derroche. En efecto, fue necesario desarrollar dos series diferentes de características para los individuos de cada especie, y poner en acción todas las estrategias biológicas con el objetivo de hacer aparecer y funcionar un cierto número de estructuras específicas para cada sexo. Para que un encuentro de este tipo tenga un resultado positivo, es necesario además que en los dos individuos, y no sólo en uno, esté todo preparado y que ambos se comporten del modo más apropiado. Por lo tanto, parece evidente que a este notable dispendio adicional

de energías tiene que corresponder una ventaja de relevancia.

Reproducirse significa, además, evolucionar, aunque todas las definiciones de vida que se daban hasta hace algún tiempo prescindieron de la evolución. ¿Qué significa evolucionar? Significa que si se toma en consideración un período mucho más extenso que el de una generación, puede observarse que la información que un padre pasa a su hijo es ligeramente diferente de la de hace cien, doscientos, doscientos mil o doscientos millones años. Es inevitable que los seres vivos evolucionen o, para ser más precisos, que sus genomas evolucionen.

Una de las observaciones más interesantes hechas originalmente por Darwin fue que cada población, natural o artificial, contenía siempre algún individuo ligeramente diferente de los demás. Observación común, que todos habían hecho incluso antes que Darwin, pero a la que no se había dado importancia, probablemente porque en aquella época la ciencia reina era la física, y la física por lo general ignora las excepciones, considerándolas poco significativas o completamente irrelevantes.

La biología, en cambio, es de algún modo la ciencia de las excepciones. Darwin advirtió la presencia de

individuos diferentes, a los que llamó variantes, y que a los que hoy denominaríamos con mayor propiedad mutantes, y verificó que ese hecho era inevitable. No había población que no tuviese variantes, aunque él no sabía explicar por qué.

Nosotros actualmente lo sabemos y ya hemos explicado antes que esa presencia se debe a los inevitables errores en el mecanismo de duplicación del ADN en cada división celular. Ese mecanismo es muy fiel y riguroso, pero no perfecto. Se calcula que, en condiciones normales, se produce en promedio un error –por ejemplo, la introducción de un nucleótido equivocado– por cada mil millones de nucleótidos copiados. Es una frecuencia de error muy poco significativa. Lamentarse por eso equivaldría a reprender a una dactilógrafa que comete un error de tipeo cada quinientas mil páginas mecanografiadas.

Pero dado que los genomas son grandes –en el caso del ser humano, contienen aproximadamente tres mil millones de nucleótidos–, aun si se comete un solo error por cada mil millones de caracteres, en los hechos tendríamos algún error en cada réplica. En nuestro cuerpo, así como en el de una bacteria, en el de un hongo o un mosquito, hay algún nucleótido diferente en cada generación. Todo esto puede no tener ningún

efecto, puede tener efectos leves, o puede tener algunos muy llamativos.

Es evidente que producir individuos diferentes no alcanza para evolucionar. Es necesario que algunos de estos individuos se afirmen con mayor o menor rapidez y reemplacen a los individuos anteriores. Esto sucede porque individuos diferentes dejan una cantidad diferente de descendientes: unos más, otros menos. Esta selección es producida por el mundo circundante y por las condiciones de existencia de cada uno de los individuos. Como resultado general, las poblaciones cambian a lo largo del tiempo a medida que las generaciones se suceden.

¿Hay un rumbo en este cambio? Diría que no, aunque muchos están convencidos de que sí. No existe una dirección especial, salvo que puede observarse una diversidad cada vez mayor de los organismos existentes. Muchos, pero no todos, se han vuelto más complejos a lo largo de los años y esta se percibe como una tendencia general. El hecho es que la presión hacia un continuo aumento de la diversidad tiene que encontrar una salida porque el espacio a disposición de las diversas poblaciones vivientes no es infinito. Y dado que los organismos no pueden volverse más simples más allá de un nivel mínimo, no pueden hacer

otra cosa más que explorar formas más complejas. Las que parecen en el fondo formas que han seguido una tendencia a la complejidad no son sino formas cada vez más diversas.

Es necesario recordar que las bacterias, que son las verdaderas vencedoras en la lucha por la conquista del planeta y que constituyen la apabullante mayoría de la biomasa total, tienen poca variación desde hace al menos tres mil millones de años, y que los parásitos de los que está lleno el mundo representan con frecuencia formas regresivas respecto de sus parientes capaces de vivir una vida autónoma. A lo largo del tiempo, por lo tanto, los organismos se han vuelto cada vez más diversos; en muchos casos eso implicó un aumento de complejidad, pero no es una regla. Todo esto se ha complicado aún más por el hecho de que nosotros, los seres humanos, nos consideramos la especie más perfecta y tendemos a dar particular importancia a los cambios que han llevado a algunas líneas evolutivas a producir individuos cada vez más parecidos a nosotros.

3. Un flujo continuo

Todos los fenómenos del mundo pueden ser descriptos en los términos de tres parámetros físicos fundamentales: la materia, la energía y la información. Pues bien, una de las características esenciales de los organismos vivientes es la de ser objeto continuo y obligado de un flujo de cada una de estas tres magnitudes. Entonces mejor digamos: "Un ser viviente se identifica con cierta cantidad de materia organizada, limitada en el tiempo y en el espacio, objeto de un continuo flujo de materia, de energía y de información, y en condiciones de metabolizar, reproducirse y evolucionar".

Veamos brevemente cada uno de estos tres parámetros. El primero, evidente desde hace mucho tiempo, es la materia. Es imposible ignorarla porque se la puede tocar y se puede experimentar de manera directa su peso, su consistencia o su dureza. Por sí sola, sin embargo, la materia no se mueve ni vive. Es necesario tener en cuenta un segundo parámetro, que es, justamente, la energía. Desde el punto de vista de

la definición física, la energía es la capacidad de realizar un trabajo. Muchos sucesos de este mundo son efecto de la energía llamada potencial, que se transforma en movimiento y que es la forma más tangible de trabajo. Pero también un cuerpo en movimiento posee una energía propia, llamada energía cinética, tal como puede observarse por los efectos que produce cuando se detiene más o menos bruscamente. La energía mecánica pasa así de un estado al otro, de potencial a cinética, o viceversa, transformándose.

Sin embargo, no existe solamente energía mecánica. El calor, por ejemplo, representa otra forma de energía. También él puede llevar a cabo un trabajo, de acuerdo a leyes de excepcional importancia, tal como explicaremos más adelante, llamadas primer y segundo principio de la termodinámica.

El primero dice que la energía puede pasar de trabajo a calor sin pérdidas, en tanto el segundo sostiene que, mientras que todo trabajo puede ser transformado en calor, no todo el calor disponible puede ser transformado en trabajo, porque una cierta parte tiene que conservar necesariamente la forma de calor, aunque a una temperatura más baja.

Esto puede observarse a diario en el motor de un automóvil: el calor generado por la combustión de la

nafta no puede transformarse todo directamente en trabajo, o sea, en movimiento. Una parte debe permanecer bajo la forma del calor irradiado por el motor y por el caño de escape. Si no fuera así, consumiríamos todos una menor cantidad de combustible; pero no se puede y por este motivo cada motor térmico tiene un rendimiento inferior al 100%, a veces incluso muy inferior.

La energía se conserva, sólo puede transformarse; en sus transformaciones sigue una dirección preferencial: tiende espontáneamente a pasar de una forma de más alta calidad a una de calidad inferior. Para designar este fenómeno se dice que la energía tiende a degradarse o a degenerar y, si no está obligada a proceder de otro modo, lo hará siempre e invariablemente en ese sentido.

La calidad de la energía térmica está relacionada con la temperatura: más alta es la temperatura, más alta es la calidad. Esto significa que la energía pasa espontáneamente de una temperatura superior a una inferior. La temperatura, a su vez, es una medida del grado de agitación de las moléculas dentro del cuerpo. Se trata de un concepto muy preciso y concreto, referido a una magnitud que se mide, como todos saben, con el termómetro.

Este paso espontáneo de la energía de un estado de alta temperatura a otro de baja temperatura podemos verificarlo sin problemas incluso en la vida cotidiana. Si coloco un bloque de hielo junto a una cacerola de agua caliente, el agua de la cacerola se enfriará y el bloque de hielo perderá temperatura hasta derretirse. Nunca sucederá lo contrario, es decir, nunca sucederá que, al poner hielo junto a una cacerola, la cacerola se caliente y el hielo se enfríe más aún.

En un sistema aislado la energía pasa espontáneamente de una forma que tiene alta temperatura a otra de baja temperatura. El ejemplo más llamativo es nuestro universo; todos sabemos que este se expande de manera continua y que esa expansión se inició a partir de un punto muy especial en el espacio y en el tiempo, que denominamos Big Bang. Hace 13-14 mil millones de años, las temperaturas del universo eran altísimas como altísima era la concentración de materia. Actualmente el universo está compuesto sobre todo de vacío. Este vacío tiene una temperatura bajísima, muy cercana al cero absoluto, que se encuentra a -273ºC por debajo de nuestro cero aproximadamente. Bien. ¡Los espacios interestelares se encuentran a apenas 2,7ºC por sobre el cero absoluto! Esto significa que en estos 13-14 mil millones de años el universo en su conjunto se fue enfriando

continuamente, al principio con mucha rapidez, luego, más lentamente. A pesar de que hay galaxias, conjuntos de estrellas y estrellas incandescentes, como nuestro Sol, el espacio interplanetario es espantosamente frío.

A inicios del siglo XIX se descubrió que la energía necesariamente debía degradarse. Cualquier motor térmico transforma cierta cantidad de energía térmica en trabajo, pero debe conservar una parte de ella en forma de energía de baja calidad: por ejemplo, los gases a altísimas temperatura de los caños de escape de nuestros motores, o en el caso de los seres vivientes, el calor que estos irradian como consecuencia inevitable de su metabolismo.

Evidentemente no es imposible hacer recorrer a los objetos el camino inverso, ya que de otro modo no existirían las heladeras. Las heladeras son máquinas que transforman una cosa fría en otra aún más fría, irradiando calor en el ambiente circundante al mismo tiempo. Por lo tanto, puede lograrse que la energía recorra el camino inverso al que haría de modo espontáneo, pero es necesario emplear una gran cantidad de energía de buena calidad. Haciendo un trabajo intenso, y degradando aún más energía, se puede lograr que momentáneamente la energía fluya en dirección opuesta a la que sería espontánea.

Muchísimas reacciones orgánicas aprovechan directamente la tendencia de la energía a pasar de un estado de alta calidad a uno de baja calidad, por ejemplo, a través de la metabolización del alimento. A esta degradación energética espontánea puede asociarse una reacción química o bioquímica que aprovecha la situación para producir algo útil. Se habla en estos casos de acoplamiento energético o de reacciones energéticamente acopladas. Con frecuencia, sin embargo, esto no basta o no se presta al uso deseado. La energía entonces es "bombeada" hacia un estado de calidad aún más alta y luego abandonada a sí misma, lo que da por resultado la posibilidad de disponer luego, como y donde se desea, de una cierta cantidad de energía de alta calidad.

Pero ¿en qué consiste realmente esta misteriosa calidad de la energía? En la escuela, para hablar de estas cosas hemos introducido el concepto de entropía. Hemos estudiado entonces que, en un sistema aislado, la entropía aumenta siempre al tiempo que se reduce la calidad de la energía, como ya hemos visto. Decimos entonces que la entropía es, de algún modo, lo opuesto a la calidad de la energía, y que aumenta al reducirse la temperatura.

La calidad de la energía que hemos asociado a la temperatura y relacionado inversamente a la cantidad de entropía, puede ser relacionada ahora con el tercer parámetro físico que hemos mencionado, la información.

La información es esencialmente, lo contrario de la entropía y está ligada de modo directo a la calidad de la energía. La información ha sido presentada en detalle y definida mediante fórmulas matemáticas precisas recién en la década del cuarenta del siglo pasado, es decir, en los años de la Segunda Guerra Mundial, aproximadamente el mismo período en el que surgió la biología molecular. El padre de la información fue Claude Shannon, un teórico de la transmisión de señales.

Todo lo que puede transmitirse –palabras, música, imágenes– puede ser medido en términos de información, a pesar de que este término figure poco en nuestro vocabulario, a diferencia de su plural "informaciones" que empleamos con frecuencia, pero que no significan exactamente lo mismo.

Shannon demostró este principio del modo más simple y natural. El concepto de información es un concepto físico riguroso, del que todos conocemos directa o indirectamente la medida. La información

se mide en efecto en bits o en bytes –un byte corresponde a 8 bits–, términos que empleamos a diario, anteponiendo llegado el caso un prefijo como kilo-(mil), mega-(un millón) o giga-(mil millones).

El tráfico de un teléfono celular, una memoria extraíble, el disco rígido de nuestra computadora, la grabación de una canción o de una película tienen una medida precisa en términos de información. Si algo contiene ocho megabytes significa que puede contener la información equivalente a cualquier otra grabación o cualquier otra comunicación que mida ocho megabytes, es decir, ocho millones de bytes, independientemente del tipo de contenido, ya sea escrito, hablado o en imágenes.

Es una de las tantas paradojas de nuestro tiempo: todos hablan a diario de bits y bytes, pero muy pocos prestan atención al hecho de que de este modo están recurriendo a un concepto tan importante como el de información. Hemos sostenido hasta ahora que la energía pasa espontáneamente de la temperatura alta a la temperatura baja o, mejor dicho, de alta calidad a baja calidad, es decir, de poca a mucha entropía. Ahora podemos decirlo de una cuarta manera: se pasa de mucha a poca información, y este es el modo en que lo enunciaremos desde ahora.

La energía por sí sola no se crea ni se destruye, sólo se transforma, y en su transformación pierde cierta cantidad de la información que está asociada a ella. Es un concepto que podemos tocar con la mano. Ninguna grabación podrá llegar jamás a destino de manera perfecta. En una grabación o, más en general, en cualquier forma de comunicación, algo se perderá, aunque sólo sea porque habrá ruido de fondo, por poco que sea. El ruido, incluso si es mínimo, no puede eliminarse porque en su esencia última consiste en la agitación térmica de las moléculas y de los iones que es imposible eliminar en un cuerpo que se encuentre a una temperatura superior al cero absoluto.

También en la vida cotidiana, la información sólo puede perderse, jamás ganarse. El juego llamado "teléfono descompuesto" en el que uno dice una palabra al oído de otra persona, que cree haber comprendido algo y lo dice a su vez al oído a otro y así sucesivamente, es el ejemplo concreto de la deformación de la información, que produce a veces efectos paradojales y divertidos.

Pero no hay necesidad de recurrir a este juego. Alcanza con sintonizar una radio en una frecuencia que tenga una señal débil. Se oirán miles de ruidos de fondo y un zumbido continuo a un punto tal que la información, es decir, la transmisión, puede

desaparecer completamente. Esto sucede cada vez que una conexión de radio no es óptima y la señal llega con interferencias. Esto significa que hay pérdida de información, y por lo tanto de orden, porque la información es la capacidad de especificar algo de modo preciso y podemos vincularla al concepto general de forma, de fundamental importancia para los seres animados. De hecho, la información puede ser definida también como una medida que contribuye a dar forma a algo informe.

La información es importante para los objetos inanimados, pero es vital para los objetos animados, al punto que hubo quien en algún momento los bautizó "informívoros", devoradores de información.

Actualmente se emplea más el concepto de comunicación que el de información. ¿Qué diferencia hay entre ambos conceptos? La comunicación es la transmisión de una cantidad de información: se habla normalmente de comunicación cuando hay un destinatario, una finalidad, un objetivo, es decir, cuando hay una intencionalidad. La comunicación es una acción mientra que la información mide un contenido. Somos perfectamente conscientes de que en el mundo de todos los días esa transmisión de información que denominamos comunicación es un

objeto precioso, digno de la más alta consideración y que debe ser protegido de la distorsión.

Para comprender los conceptos de materia, energía e información, puede resultar útil hacer una analogía con algo familiar, tomando como ejemplo el teléfono celular. El celular es un objeto material; puede contener una batería pero si está descargada tendremos sólo la materia del objeto. Si la batería está cargada habrá también energía, porque la batería cargada contiene una cierta cantidad de energía que puede ser degrada y por lo tanto transformada en trabajo mecánico o electromagnético, necesario para recibir la comunicación. Un celular con la batería cargada, pero sin la *SIM card*, la tarjeta de memoria, no sirve para nada ya que no se trata de un teléfono activo. Si quisiéramos dar un ejemplo aún más extremo, el celular con la *SIM card* que se encuentre en una zona en la que no hay señal electromagnética tampoco sirve para nada. Por lo tanto, la materia es el celular mismo y su batería; la energía proviene de la carga de la batería; lo que recibe la *SIM card* es finalmente la información.

Hemos dicho que una de las características esenciales de los seres vivos es la de ser continuamente objeto de un flujo de materia, de energía y de información. Veamos un punto por vez.

En primer lugar, todos los seres vivientes introducen materia dentro de su propio cuerpo todo el tiempo. Los animales comen, pero también hacen lo propio las plantas, al absorber dióxido de carbono y agua, y transformarlos en azúcares y luego en tejido vegetal. Del mismo modo, organismos mucho más exóticos –a los que nosotros denominamos extremófilos porque viven en condiciones extremas de temperatura, de acidez, de salinidad, etc.– logran procurarse "alimento" extrayéndolo de las sustancias más diversas.

¿Qué es lo que recibimos del alimento? Naturalmente, la materia. Si somos recién nacidos o muy jóvenes, podría pensarse que la materia sirve para crecer, para formar nuevas células y desarrollar el cuerpo, pero en realidad comemos también mientras somos adultos. Ya hemos hablado de este fenómeno y de la necesidad de introducir continuamente materia nueva en nuestro cuerpo para reemplazar con cierta regularidad todos los átomos de los que estamos hechos. Se trata de un proceso continuo de sustitución y revisión, necesario para mantener en forma nuestro cuerpo.

También a nivel macroscópico se observa que las células del organismo mueren y deben ser reemplazadas continuamente, en la sangre, en la piel, o en la mucosa intestinal. Por lo tanto, nosotros seguimos siendo

aparentemente los mismos pero estamos en constante mutación.

Pero esto no es todo. Comemos al menos por tres razones: introducimos materia dentro de nosotros porque tenemos continuamente necesidad de sustituir nuestros átomos; introducimos energía bajo la forma de energía de mejor calidad, que luego degradamos a energía de inferior calidad y que luego finalmente eliminamos; e introducimos información, siempre a través de la degradación de la energía del alimento.

En el mundo de la vida todo parte de la energía térmica del Sol y termina en productos de desecho. Entre estos dos extremos se juega el proceso de la degradación progresiva de la energía, que constituye la esencia energética e informacional del juego de la vida, en el que cada organismo se ubica en su propio nivel utilizando como "buena" la energía química de cierto tipo, y como "degradada", la energía química de otro tipo.

En este punto es necesario mencionar brevemente la diferencia entre la energía puramente térmica y la energía química. Un ejemplo simple es el cambio de estado de una sustancia de líquida a sólida y viceversa, o de la mezcla de dos líquidos o de dos gases. Dos gases puros que se encuentran a la misma temperatura tienden espontáneamente a mezclarse, es decir, a perder

información, mientras que espontáneamente jamás se separarán. Una mezcla, en efecto, se encuentra a un nivel entrópico superior y a un nivel informacional menor que cada uno de los dos gases o los dos líquidos por separado. Ya hemos dicho que todos los cuerpos tienden a perder calor, y los gases diferentes tienden a mezclarse entre ellos. Nunca sucedió que dos gases mezclados por sí mismos se separasen espontáneamente, así como un sólido que se está fundiendo nunca tomará de modo espontáneo la dirección opuesta. Por lo tanto no es, o no es solamente, cuestión de temperatura sino del estado de organización interna de las sustancias que se están analizando.

A veces, incluso, la acción del paso de calor y del cambio de organización interna pueden tener un efecto opuesto. Es por ese motivo entonces que los dos efectos deben ser evaluados en conjunto. Existe un término que aún no hemos presentado, que toma en cuenta estos dos efectos: el de "energía libre" o "energía útil", definida por una única fórmula que considera todos los equilibrios, tanto energéticos como entrópicos, que tienen lugar en una reacción. Esto se debe al hecho de que consta de dos términos, uno de los cuales representa la contribución de la energía térmica, y el otro, el de la energía que refleja el cambio de organización.

Pues bien, en una reacción cualquiera, esta energía libre sólo puede disminuir. Por lo tanto, es afín a la información, pero toma en cuenta más de un parámetro a la vez. Usaremos este término lo menos posible, para no volver pesado nuestro texto, pero será conveniente recordar a partir de ahora que "degradación de la energía" y "disminución de la energía libre disponible" son sinónimos. Todas las reacciones tienden a ir espontáneamente en esa dirección.

Naturalmente, la energía química no tiene que ver sólo con cambios de estado o con mezclas de fluidos. Existen otras transformaciones en las que se adquiere o se pierde información, basadas en la verdadera organización interna de las moléculas de las distintas sustancias. Por ejemplo, un azúcar como la glucosa tiene un contenido informacional más alto que el anhídrido carbónico y que las moléculas de agua de las que está también compuesto, de modo que para sintetizarlo a partir de aquellas, es necesario emplear energía de buena calidad, que se libera cuando el azúcar se descompone nuevamente.

En el caso de la vida, además, las moléculas implicadas se asemejan todas entre sí desde el punto de vista químico y por consiguiente los cambios, espontáneos u obtenidos con gasto de energía, serán casi siempre una

cuestión de cambio de organización interna. Las moléculas orgánicas más comunes se disponen en un orden simple y bien preciso en lo que respecta a su contenido informacional y, por lo tanto, de energía libre. Si a esto se añade el hecho de que los fenómenos biológicos suceden casi siempre a temperatura constante, puede comprenderse fácilmente que todo se resuelve con frecuencia en una transformación que va desde moléculas más organizadas a moléculas menos organizadas, o viceversa.

Todo esto implica dos ventajas. En primer lugar, no son necesarios grandes intercambios de nuevas moléculas: se trata en realidad de los cuatro o cinco tipos habituales de átomos unidos entre sí en estructuras químicas elementales. Además, al pasar de un compuesto a otro, los saltos de energía libre nunca son de grandes proporciones: pocas unidades de energía libre separan a uno de otro. Las reacciones bioquímicas que sostienen la vida consisten por lo tanto en pequeños pasos, realizados con gasto mínimo de energía, en un sentido o en el otro, sin "estallidos" ni saltos energéticos llamativos.

Todo esto es el fundamento de una de las características más importantes de los fenómenos vitales: una administración muy precisa y muy medida de la

energía libre disponible que proviene en definitiva del alimento y de la luz del Sol.

Las plantas y todos los organismos verdes están en condiciones de capturar directamente esta forma de energía y de utilizarla para realizar la fotosíntesis clorofílica, es decir, la producción de materia orgánica, en la forma de azúcares, a partir del dióxido de carbono que se encuentra en la atmósfera, y del agua, con la simultánea liberación de oxígeno. Sin la luz del Sol, las plantas no podrían existir: son tan eficientes que la utilizan directamente, algo que nosotros no sabemos hacer. Fueron miles y miles de millones de organismos fotosintéticos los que produjeron, en los albores de la vida, todo el oxígeno que respiramos, y sin el cual no podríamos vivir. Por lo tanto, nosotros, los animales, le debemos muchísimo a la fotosíntesis: esta permite la existencia de los vegetales de los que nos alimentamos, y de los cuales a su vez se alimentan los animales que nosotros comemos, y nos suministra continuamente el oxígeno que tenemos que respirar.

Casi todos los seres vivos respiran, es decir, queman lentamente muchas de sus sustancias en un proceso de combustión en el que el oxígeno funciona como comburente. Este fenómeno produce energía y escorias. Las escorias son calor de bajo valor, agua

y dióxido de carbono. Por ello, las escorias de todas las escorias de nuestro cuerpo son, en definitiva, agua y dióxido de carbono, los productos directos de la oxigenación continua que denominamos respiración.

Este es uno de los tantos ejemplos de la unicidad y de la selectividad de la vida, que ha efectuado una serie de elecciones que con el tiempo se volvieron obligatorias. La fotosíntesis clorofílica confirió al dióxido de carbono y al oxígeno un rol insustituible en la dinámica de lo viviente, elevando estas sustancias al rol de pilares de la vida terrestre, naturalmente con la ayuda del Sol. Se trata de uno de los tantos ejemplos de la contingencia transformada en ley férrea o, si se prefiere, del azar que se vuelve necesidad y, más aún, necesidad imperiosa.

Además, pueden identificarse características particulares de los seres vivientes que no encuentran ninguna otra justificación más que una primera afirmación casual y una consiguiente perpetuación. Desde el punto de vista químico, los aminoácidos, por ejemplo, pueden existir en la forma D (dextrógira) o L (levógira), pero de hecho, en todos los seres vivientes se encuentran únicamente aminoácidos en la forma L. No es posible encontrar un motivo que explique esta peculiaridad, salvo tan sólo que en

algún estadio inicial del evento vida se incorporaron solamente aminoácidos L y a partir de ahí, nunca más pudo cambiarse dicho estado de cosas sin enfrentar la posibilidad de un desastre a escala planetaria.

Un segundo ejemplo está dado por la universalidad del código genético. ¿Por qué motivo TTT significa fenilalanina para todos los seres vivientes, y ATG siempre significa metionina? No lo sabemos. Sólo podemos suponer que en cierto momento de la evolución biológica se afirmó esta alternativa, que luego ya no fue posible alterar.

Se habla en estos casos de "incidentes congelados", otro modo de designar a esas elecciones más o menos casuales, fijadas y congeladas en las generaciones sucesivas. También acá –como en el caso de los errores de copia del genoma en la fase de duplicación– es necesario estar atentos a no dar una connotación negativa al término. En esta locución, "incidente" representa tan sólo la traducción del inglés *accident* (en la expresión *frozen accident*), que significa acontecimiento accidental, es decir, casual, sin ninguna connotación negativa.

Para comprender mejor los secretos de esta singular administración de la energía libre disponible característica de los seres vivientes, podemos recurrir

a una analogía mecánica. Imaginemos una serie de mecanismos, movidos todos por la caída de un peso. Cuanto mayor es el peso, y más prolongada su caída, más cantidad de energía entrará en el sistema. Con esta energía el sistema puede realizar directamente una cantidad de trabajo, pero además puede usarla para poner en acción "motores" auxiliares, cargando un resorte o elevando un cierto número de pequeños pesos que luego se harán caer de nuevo. A continuación, el resorte cargado puede realizar el trabajo, y los pequeños pesos, caer, aportando la contribución de tantas otras pequeñas cantidades de trabajo.

De este modo se obtienen diferentes resultados: se prolonga en el tiempo el efecto de la caída del peso principal, se distribuye su efecto de la manera y en la medida que se desea entre las diferentes partes del mecanismo, y se producen varias pequeñas acciones aunque ninguna de ellas tiene un efecto deflagrador sobre el conjunto ni conduce a peligrosos saltos de temperatura.

Todo el secreto del equilibrio energético e informacional del metabolismo radica en el conjunto de estos pequeños artilugios: consumir, producir y volver a consumir energía en pequeñísimos pasos, a través de un proceso que se presenta sin prisas pero sin pausas.

Eso que nosotros denominamos pasos son en verdad reacciones bioquímicas que se producen de manera muy regulada y con tiempos justos. Una reacción bioquímica no puede durar un año, ni una semana porque durante ese lapso la célula en cuestión ya se habría subdividido. Y, sin embargo, según las leyes de la química, los tiempos necesarios para el cumplimiento de muchas reacciones orgánicas son más bien extensos. ¿Entonces?

Las reacciones bioquímicas, es decir, aquellas que son características de la química de la vida, se aceleran notablemente gracias a la presencia de las enzimas, otro hito fundamental en la aventura de lo viviente. Una enzima es una proteína que actúa como catalizador para acelerar, a veces en gran medida, una reacción bioquímica. Como todos los catalizadores, una enzima no puede producir reacciones que estén prohibidas por las leyes de la química, pero sí puede permitir que las permitidas sucedan en lapsos de tiempo muy reducidos.

Si dos moléculas deben reaccionar, en general están obligadas a acercarse mucho la una a la otra, pero no significa que eso suceda con frecuencia a partir de sus movimientos espontáneos y desordenados. Aunque estas dos moléculas se encuentren, eso no significa

necesariamente a priori que una ofrezca a la otra la parte más adecuada para permitir que suceda la reacción de la que formarán parte. El rol de la enzima, específico para esa determinada reacción, es justamente tomar de la mano, por así decirlo, a ambas moléculas destinadas a participar de la reacción, acercarlas, mantenerlas juntas durante todo el tiempo necesario y orientarlas de modo que cada una presente a la otra la parte adecuada.

Una enzima es, entonces, una especie de "par de manos" microscópicas que eligen a las dos moléculas que deben participar de una reacción específica, las acercan y las orientan hasta que la reacción se produce. Esta reacción puede consistir en el intercambio de una pequeña porción –un grupo metilo o incluso tan sólo un átomo de hidrógeno– que pasa de una molécula a la otra, o también en un doble intercambio: una pequeña porción de la primera molécula pasa a la segunda mientras una parte de la segunda pasa a la primera.

Los tipos de reacciones químicas –metilación, deshidrogenación, oxidación, fosforilación y alguna más– son relativamente poco numerosos, mientras que es enorme la cantidad de pares de moléculas que deben participar de ellas. La enzima actúa de un modo absolutamente específico: elige entre todas las

dos moléculas implicadas y las obliga a participar en esa determinada reacción y solamente de ella.

Las moléculas que deben participar en la reacción no serán tantas, estarán distribuidas por doquier y ciertamente no se encontrarán en el vacío. Entre ellas y en torno a ellas se encontrarán millones y millones de otras moléculas, algunas muy semejantes. La enzima entonces debe reconocerlas, engancharlas, transportarlas y finalmente acercarlas la una a la otra del modo correcto. La especificidad de esta acción siempre atrajo la atención de los biólogos y constituyó un problema biológico fundamental a lo largo de muchos decenios.

No hay nada mágico en la acción de las enzimas, que no son sino proteínas: todo depende de su estructura. La especificidad de su acción deriva de modo directo de su estructura singular. Esto nos remite a la estructura de esas macromoléculas particulares que son las proteínas, es decir, a un típico problema informacional.

Hemos visto que las proteínas son cadenas lineales de aminoácidos. De qué aminoácidos consisten y sobre todo en qué orden están dispuestos es la base de la sorprendente especificidad de las proteínas, que depende a su vez, aminoácido por aminoácido, de la

secuencia de nucleótidos del tramo de ADN que debe especificarlas. La indispensable especificidad de las proteínas puede entonces remitirse a la sorprendente especificidad de los diferentes genes del ADN. Orden por orden, exactitud por exactitud.

Además de la materia y la energía, a través del cuerpo de un ser viviente fluye continuamente cierta cantidad de información. Ya hemos hablado de esto, aunque de modo indirecto: de la digestión de los alimentos y de la degradación de la energía, los seres vivientes recaban todo el tiempo cierta cantidad de información. Ya hemos hablado de las estrategias puestas en acción por los seres vivos para asegurarse una utilización prudente de la energía libre. Desde el punto de vista energético se ha manifestado como algo sumamente útil el hecho de que los compuestos orgánicos en las principales reacciones metabólicas se diferencien muy poco entre ellos de manera tal que se puede avanzar a pequeños pasos sin grandes desniveles energéticos. En lo que respecta al control de la información, la estrategia consiste, en cambio, en el hecho de que esta se presenta en gran medida digitalizada y codificada.

Para comprender lo que estamos diciendo debemos hacer referencia a algunos aspectos de la electrónica

y al estudio de la transmisión y de la información en general. Para ser registrada y transmitida, la información debe estar codificada, por lo general sobre un soporte material diferente de aquel en el que se originó. Por ejemplo, la onda sonora correspondiente a una canción debe ser transformada en una onda electromagnética.

La codificación puede ser analógica o digital. Se habla de codificación analógica cuando se trata de reproducir punto por punto del modo más fiel posible el perfil de la onda de partida. Este es el sistema más natural y el primero que se usó en las grabaciones y las transmisiones. Sin embargo, luego se descubrió que ese no es el mejor modo de preservar con fidelidad el mensaje de partida. Una manera sin duda mucho mejor es la que se denomina codificación digital, universalmente utilizada en la actualidad.

Un primer ejemplo del procedimiento digital se dio en su momento con la codificación del mensaje en grupos de puntos y líneas propia del código Morse. En ese caso se trataba ya de elementos discretos que podían ser recibidos o no, pero difícilmente confundidos. Hoy los procedimientos de codificación digital son casi en su totalidad electrónicos: se transforma radicalmente el perfil de la onda de partida, muestreándola

en una recopilación de datos numéricos que luego son grabados o transmitidos. A partir de estos datos se reconstruye luego la onda de partida, o una copia muy fiel de ella. La electrónica y la teoría de la información nos dicen que actuando de este modo se ganó mucho en términos de fidelidad y confiabilidad.

La información biológica está en gran parte codificada de manera digital a partir del mensaje genético contenido en el genoma. Todas las informaciones biológicas, desde las más banales hasta las más preciosas, están escritas de modo discontinuo utilizando letras separadas, como en nuestro sistema de escritura. La información biológica es extremadamente preciosa: no debe asombrar que el cuerpo haga todo lo que está a su alcance para preservarla, desde la información genética contenida en el genoma, hasta la que circula por los circuitos del sistema nervioso.

Hablemos primero de esta última y veamos cómo se transmite la señal nerviosa a través de las prolongaciones celulares que conectan entre sí a las células nerviosas. Se suele decir que la conducción de una señal nerviosa es un fenómeno "todo o nada": o arranca o no arranca, pero si arranca, su forma es obligatoria y constante. Ya en su esencia, por lo tanto, la administración de la información nerviosa es digital y codificada.

Esto la preserva, y la previene en gran medida de su proceso de disipación.

Pero hay más. La información obtenida mediante los sentidos se origina ya de un modo codificado, por medio de un mecanismo de codificación digital sumamente eficiente y selectivo. En efecto, nuestros sentidos no observan pasivamente el mundo sino que le formulan preguntas específicas que están preordenadas y codificadas en el genoma de cada especie. Cada grupo de células nerviosas correspondientes a un receptor sensorial o vinculadas directamente a él le plantea al medio ambiente preguntas específicas a las que el ambiente responde a su modo, mediante un repertorio cerrado de acciones químicas o físicas que nosotros llamamos estímulos.

La reacción a los estímulos viaja a través de los circuitos nerviosos hasta que compone, en el cerebro, un cuadro sensorial que puede ser interpretado. También en la interpretación y la sucesiva administración de la información sensorial se procederá mediante esquemas discretos alternativos. En conclusión, toda la información sensorial y perceptiva es discreta, digitalizada y codificada.

Sin embargo, no hay duda de que la victoria de la digitalización y de la codificación está en la conservación

y la transmisión de la información genética. El mensaje genético es transmitido por largas cadenas de caracteres discretos, pertenecientes a un alfabeto limitado y muy restringido.

Hace tan sólo cincuenta años nadie habría podido imaginar que toda la riqueza de matices contenida en el patrimonio biológico de un individuo podía simplemente ser "relatada" en un conjunto de frases escritas de forma lineal utilizando caracteres discretos. De qué modo la evolución biológica llegó a este punto es algo que no sabemos, pero podemos comprobar que este tipo de organización tiene sus ventajas. La información misma debe ser conservada del modo más fiel posible cada vez que la célula se divide y da lugar a dos células hijas. Después de cierto número de generaciones celulares se deberá pensar también en la reproducción del organismo en su conjunto mediante la producción de gametos o células especializadas de otro tipo.

También en este proceso el patrimonio genético debe ser transmitido intacto, es decir, lo más fiel a sí mismo posible, de una generación a la otra. Pero la información genética contenida en una célula no solamente debe ser transmitida a las células hijas sino que asimismo debe ser consultada a cada momento por la misma célula que la contiene. Por lo tanto, tiene que ser conservada

y reproducida, y no sólo transmitida, del modo más fiel posible aunque en ese caso operen mecanismos generadores de ruido que son mucho más fuertes que los que pueden aparecer en un cable telefónico o en un canal de transmisión de radio. La materia orgánica es infinitamente más "sucia", fluida y agitada que la utilizada en la electrónica.

La codificación específica le confiere a la información genética una importante ventaja. Cada letra del genoma puede asumir tan sólo cuatro formas aceptadas, A, G, C o T. Es obvio que desde el punto de vista químico puede asumir muchas otras formas, pero estas no tendrían ningún significado biológico; en realidad no podrían ser siquiera "vistas". Esto reduce en gran medida los efectos de una perturbación causada por la agitación térmica, imposible de eliminar, del material biológico. Esto no significa que la información genética permanezca siempre igual. Todo lo contrario. Sabemos que existen las mutaciones, que no pueden ser eliminadas por completo.

Una mutación es el cambio de una sola letra del genoma que muta de una forma a otra. Pero una A puede convertirse en una G, una C o una T, no puede convertirse en ninguna otra cosa, ni tampoco en un cuarto de G y tres cuartos de T ni ninguna de las

demás combinaciones posibles. Por lo tanto, puede cambiar, pero no sin regularidad. Sigue siendo imposible de eliminar el ruido pero este queda, para decirlo de algún modo, "encerrado".

Es inútil subrayar que la naturaleza discreta del código genético se basa en el hecho de que puede apoyarse en moléculas discretas –de un tipo o de otro, pero no mixtas–, y esto se debe a su vez, al hecho de que ellas hunden sus raíces en la granularidad de la materia regulada por los principios cuánticos, un mundo del que apenas asoman, como ya hemos señalado.

El ADN es, hasta el presente, el soporte de la información con mayor capacidad que existe. Cada nucleótido puede transportar dos bits de información y ocupa apenas una milmillonésima de metro. Ninguna otra forma de codificación conocida, natural o artificial, puede compactar la información en tan poco espacio. Traducido al lenguaje del ADN, el contenido de todos los textos de una enorme biblioteca o de todos los datos de Internet podría caber en una minúscula gota de líquido.

4. El texto y el programa

La información genética presente en cada ser vivo está, entonces, digitalizada y codificada en su genoma. Desde un punto de vista abstracto, el genoma se presenta como un texto, un gigantesco texto que contiene las instrucciones para vivir. Del texto tiene la articulación en letras del alfabeto, del texto tiene la linealidad, los capítulos y la separación entre un capítulo y otro. Pero en su esencia el ADN es también un programa, más aún, es "el" programa.

La acción de los genes, es decir, de esos tramos de ADN que codifican la secuencia aminoacídica de una determinada proteína, debe ser rígidamente controlada y regulada porque la proteína en cuestión debe ser sintetizada en el lugar justo, en el momento justo y en la cantidad justa. Todo esto está escrito en el genoma, aunque de un modo que por el momento aún resulta difícil de descifrar.

El concepto de programa se ha vuelto familiar gracias a las computadoras y a su mundo. En ese caso

el programa es el conjunto de operaciones que debe realizar la computadora, en un orden preestablecido, para que pueda alcanzarse un objetivo dado. En este sentido, el genoma es ya sin duda un programa o, mejor dicho, un conjunto de programas que tienen en común el objetivo de mantener con vida al individuo y la perpetuación de su especie.

Entre estos dos significados de la palabra programa existe por supuesto cierta diferencia. El objetivo que se debe alcanzar mediante un programa informático es claro, explícito y sin ambigüedades, mientras que muchos de los objetivos del genoma aparecen apenas esbozados, con matices, y con frecuencia mezclados entre sí. La diferencia se explica fácilmente con la historia de los dos procesos. El programa de la computadora ha sido proyectado por alguien, con el propósito claro de lograr un objetivo específico, único entre tantos otros, y bien presente en la mente de quien lo ha proyectado. Muy diferente es, en cambio, la historia de las múltiples funciones que hacen de un ser vivo un ser vivo, y de las que conocemos sólo una fracción, y comprendemos bien en una porción aún menor.

Desde hace un tiempo, por ejemplo, sabemos que poseemos mucho más ADN del necesario. Todos

juntos, los genes no ocupan más del 30% del ADN del genoma. Esto significa que hay un 70% del genoma que no está compuesto de genes. Hay quien ha definido a esta porción como "ADN en exceso" o incluso "ADN basura". En rigor, los genes propiamente dichos, es decir, las secuencias de ADN que codifican las proteínas, ocupan tan sólo el 3% de la secuencia del genoma. Sin embargo, sabemos también que es necesaria una región al menos diez veces más amplia para la correcta activación de estos genes. De este modo se llega más o menos al 30%.

Muchos piensan que el ADN no codificante, es decir, excesivo, seguramente contiene informaciones de gran valor, aunque desconocidas por el momento. Probablemente de aquí a diez o quince años se sabrá mucho más sobre la función de este ADN, pero por el momento debemos detenernos acá. Estamos todos convencidos de que lo más importante del genoma no son los genes por sí mismos sino la regulación de su acción, producida, muy probablemente, por la parte del ADN que no contiene genes. Al comparar los genomas de diferentes especies se advierte que la parte que codifica proteínas, es decir, los genes en sentido estricto, son increíblemente parecidos en especies diferentes e incluso muy diferentes entre sí.

Si comparamos, por ejemplo, al hombre y al chimpancé, se puede advertir que la parte que codifica las proteínas es homóloga, es decir, casi igual, en un 99%. Naturalmente, hay cierta diferencia entre el hombre y el chimpancé; hay algunas diferencias que pueden considerarse banales, como el modo de caminar, tener el cuerpo cubierto de pelo o no, la forma del maxilar o de la caja craneana, pero otras resultan mucho más interesantes, como el aprendizaje y el uso del lenguaje. El hombre posee un lenguaje articulado mientras que los animales, incluidos los chimpancés, no.

Los animales se comunican perfectamente entre ellos, pero se comunican de un modo completamente diferente al nuestro. Lo hacen mediante sonidos, por decirlo de algún modo, monosilábicos, cuyo significado es perfectamente claro para los miembros de una población o de una especie, y que consiste más en una orden, una advertencia o una señal que en un discurso.

Estos sonidos monosilábicos en general no se combinan entre sí: se emplea uno, luego otro, y luego otro. Cuando nos referimos al lenguaje humano, en cambio, debemos tener en cuenta su carácter modular y su componibilidad. Nosotros utilizamos las sílabas y las palabras, y las combinamos en un número

prácticamente infinito de modos diferentes. El lenguaje como yuxtaposición significativa de unidades que de por sí son poco significantes, es una especificidad puramente humana.

¿Dónde está escrito que nosotros poseemos un lenguaje articulado y los chimpancés, no? No lo está sin duda en los genes que codifican las proteínas. Seguramente estará escrito de algún modo en el genoma de ambas especies y, por descarte, sólo puede estar escrito en la parte que no codifica las proteínas.

Más en general, entonces, podríamos pensar las proteínas del cuerpo como si fueran las piezas del Lego con las que se construye una iglesia, una fábrica o un gimnasio. Lo que distingue entre sí a estas construcciones no son los ladrillitos, casi siempre iguales, sino su disposición. Por analogía, podemos pensar los genes que codifican las proteínas como la fuente de los diferentes ladrillitos –que no son pocos sino varios millares–, pero el mensaje importante de especie a especie está dado por cómo esos ladrillitos están dispuestos, uno sobre otro, o uno junto al otro.

A pesar de todas estas dificultades, muchas de las instrucciones transmitidas por el ADN del genoma pueden efectivamente ser consideradas como programas en sentido informático. Tienen una finalidad

bien precisa y entran en acción cuando es necesario, muchas veces en secuencia. Comprobar esto nos ayuda a comprender la acción del genoma y a formarnos de él una adecuada representación mental. Sin embargo, existe un significado más preciso de la palabra programa, en sentido coordinado y global, que puede asociarse a la acción del genoma y que nosotros designaremos con el término "programa de desarrollo": la concertación y la ejecución del conjunto de los procesos que llevan al desarrollo de un organismo pluricelular, como una rana, un pollito o como uno de nosotros.

El desarrollo es tan sólo una fase de la vida de los organismos, pero su importancia no tiene parangón. Ningún organismo nace adulto, sino que debe desarrollarse del modo más adecuado para poder vivir su vida, ya sea por mucho o por poco tiempo. El programa es amplio y exhaustivo. La enorme cantidad de células que componen el organismo mismo se ha ido estructurando poco a poco a partir de una única célula, que los biólogos denominan cigoto, y que deriva de la célula huevo de la madre fecundada por el espermatozoide del padre.

En primer lugar el cigoto tiene que dividirse en dos células; estas, en cuatro; luego, en ocho y así hasta llegar al número final. Al mismo tiempo deben suceder

dos tipos diferentes de acontecimientos de importancia capital, que se encuentran en el origen de la forma viviente: debe formarse la totalidad de los diferentes tejidos del cuerpo, y el cuerpo mismo debe tomar su forma final, interna y externa.

El primer acontecimiento se denomina, genéricamente, diferenciación o diferenciación celular, mientras que el segundo, al que podemos llamar morfogénesis, debe aportar la información posicional necesaria a la masa de células en vías de diferenciación y maduración para formar un cuerpo que funcione y que tenga todas sus partes en la disposición necesaria.

Como casi todas las distinciones teóricas, también la distinción entre diferenciación y morfogénesis tiene un valor puramente didáctico, ya que ambos procesos se producen en forma paralela y contextual.

Lo único cierto es que cada célula de un cuerpo que se está desarrollando necesita recibir ambos tipos de información: en qué tejido va a convertirse y en qué parte del cuerpo se ubicará. A la primera pregunta responden los eventos vinculados a la diferenciación, mientras que a la segunda dan respuesta los mecanismos morfogenéticos.

La secuencia de los procesos morfogenéticos, estrechamente controlados por familias de genes específicos,

prevé el diseño de la futura forma del cuerpo del organismo, traza sus rasgos esenciales y las diferentes estructuras somáticas hasta los últimos detalles. En primer lugar debe delinear los ejes corporales fundamentales, el de cabeza-cola y el dorso-ventral que determinarán a su vez y al mismo tiempo, el eje derecha-izquierda. Todo esto a partir de una célula huevo fecundada o de un embrión precoz que tienen una simetría más marcada: no exactamente la de una pequeña esfera sino la de un pequeño mendrugo cilíndrico. Después de la determinación de los ejes corporales es necesario alinear sobre ellos las estructuras corporales pertinentes, y finalmente construirlas y plasmarlas en modo correcto.

Si hablamos de animales con una estructura semejante a la nuestra, el eje fundamental es sin duda el céfalo-caudal, que va desde la cabeza hasta la cola. A lo largo de este eje se dispondrán en una sucesión ordenada primero la cabeza, luego el tórax y finalmente el abdomen. Vale la pena señalar que esa sucesión es común a todos los animales de las especies superiores, de las medusas en adelante. No encontraremos nunca un animal superior que tenga, por ejemplo, la cabeza interpuesta entre el tórax y el abdomen, o cuyo abdomen ocupe una posición central. Esta observación

aparentemente banal revela por el contrario una profunda e insospechada verdad: los genes que controlan la disposición de las principales partes del cuerpo son absolutamente los mismos en todos los animales superiores, ¡de la lombriz a la rana, del mosquito al hombre!

Lógicamente no se trata de genes cualesquiera, sino de genes de alto nivel jerárquico, una especie de "supergenes", cuya función consiste en controlar a tiempo la activación y desactivación de otras familias génicas. Serán luego estas últimas las que realizarán materialmente el proyecto, mientras que los supergenes en cuestión se limitarán a impartir directivas de carácter general, de algún modo como hacen los arquitectos en el proyecto de una casa: deciden "aquí el comedor, aquí el dormitorio, aquí la cocina", pero el proyecto en realidad lo llevan a cabo, en concreto, otras personas. Por este motivo yo mismo denominé en su momento "genes arquitectos" a los genes de los que estamos hablando.

Como es natural no alcanza con disponer de manera ordenada la cabeza, el tórax y el abdomen a lo largo del cuerpo; es necesario también que estas zonas estén dotadas de las estructuras corporales específicas y adecuadas en su forma y en su funcionalidad. Estas

acciones y muchas otras son la principal realización del programa de desarrollo genético transmitido por el genoma de cada organismo.

Si observamos un organismo adulto, tenemos la impresión de que el factor tiempo no es tan importante; el hecho de que en una cierta fase un acontecimiento tenga lugar antes o después de otro no es a fin de cuentas tan importante. En realidad, durante el desarrollo las cosas son muy diferentes: aquí el factor tiempo y la sucesión de los acontecimientos son cruciales. Es por eso que hemos hablado de programa de desarrollo, para señalar ese conjunto ordenado de instrucciones genéticas primero, y de acontecimientos biológicos después, que permiten el correcto desarrollo de un organismo pluricelular.

Aunque sólo sea porque el desarrollo ocurre antes y condiciona profundamente toda la vida de un organismo, conviene considerar al genoma como la fuente (y la esencia) de un programa, que en esta acepción significa un conjunto ordenado de programas que deben sucederse correctamente a lo largo del tiempo. Se trata, en suma, de la ejecución ordenada de cierto número de programas elementales. Para un organismo superior, por lo tanto, el genoma contiene, y él mismo es, un programa. Pero esto que decimos no concierne sólo y

estrictamente a los organismos pluricelulares, por más importantes que sean y por más cercanos a nosotros que los sintamos. El desarrollo de un organismo pluricelular representa el prototipo del programa de desarrollo que se articula a lo largo del tiempo, pero esta no es su característica exclusiva.

En el fondo, toda la vida es un acontecimiento que posee un perfil temporal, aunque es lo suficientemente lento y distribuido a lo largo de un período de tiempo más extenso que el del desarrollo embrionario. Ningún acontecimiento biológico, sin embargo, revela la misma concertación detallada y la exacta escansión temporal de los procesos que llevan al desarrollo de un organismo superior.

Durante este proceso puede observarse la ejecución de una precisa sucesión de activación y desactivación selectiva de genes específicos, pero es necesario hacer algunas aclaraciones. Al inicio, el programa de activación de esos genes es de naturaleza puramente genética, es decir, casi automático. Con la presión de tener que actuar pronto y en ausencia de señales provenientes del resto del mundo, son tan sólo los genes los que, con su encendido y apagado programado, pueden dar inicio a los múltiples procesos que conducen al desarrollo, y después los siguen atentamente durante algún tiempo.

Progresivamente la situación cambia, al menos por dos motivos, uno de orden espacial y otro de orden temporal.

En primer lugar, el cuerpo comienza a tener su propia dimensión, aunque sea mínima, y se inicia por lo tanto un diálogo entre sus partes. Las células de las diferentes zonas del embrión, ya de por sí ligeramente diferentes entre sí, pueden comenzar a comunicarse entre ellas, y esta comunicación influye a su vez en la actividad de los genes, hasta ese momento dictadores indiscutidos. El embrión en su conjunto también comienza a interactuar con el ambiente circundante, que puede ser muy diferente, pero que, en el caso de los mamíferos, coincide con una zona del útero materno.

La estrecha interacción entre la acción de los genes y la comunicación entre las células, y el ambiente circundante confiere a la palabra "programa" una dimensión diferente y más abarcativa. El programa de desarrollo de cada célula, en efecto, debe dictar las instrucciones para los varios pasos de los que consta, en absoluto o también con una referencia precisa a los posibles mensajes que vienen desde el exterior de la célula misma.

Tiene que prever todo, o casi. En suma, es un programa dinámico, abarcativo e interactivo que en diferentes

circunstancias puede tomar formas muy diversas: un superprograma que coordina una multiplicidad de subprogramas y que puede adoptar formas diferentes. En este punto surge la pregunta habitual: ¿cómo hace el programa, es decir, el genoma, para "saber" todas estas cosas y contemplar tantas variables y tantas variantes?

El genoma no es omnisciente, obviamente; a su manera interpreta sólo una pequeña parte de las señales que le llegan desde las variadas fuentes, una parte establecida por él mismo y en cierto modo codificada; pero aun así, su capacidad es impresionante. Su sabiduría –su visión de futuro– deriva de su pasado evolutivo: ha acumulado todo a lo largo de los millones y millones de años de su historia. La explicación es la que ya hemos mencionado otras veces: si el genoma del organismo en cuestión no hubiese "aprendido" lo que había que aprender, el propio organismo ya no existiría y muy probablemente no existirían tampoco muchos de sus antepasados.

Por lo tanto, ha sido necesario que aprendiera a lo largo del tiempo lo que ha aprendido, a riesgo de su propia supervivencia. No se trata de una necesidad lógica sino histórica. Una necesidad que podría no haberse presentado, pero entonces no estaríamos acá hablando de ella y, más aún, ni siquiera estaríamos.

Pero todavía hay más. El ADN "recuerda" cosas acaecidas mucho tiempo atrás, pero el conjunto del ADN y de las proteínas nucleares que lo acompañan y lo envuelven en la estructura cromosómica en la que se encuentra recuerda también lo ocurrido algunos minutos o algunas horas antes. El conjunto ADN-proteínas cromosómicas registra, en definitiva, todos los acontecimientos celulares ocurridos desde el inicio del desarrollo del organismo. Esto es muy importante y representa el motivo de orden temporal del que hemos hablado anteriormente.

La activación y desactivación de un gen son acontecimientos tan importantes que deben ser controlados y vueltos a controlar por un gran número de mecanismos que involucran obviamente al ADN, pero también muchos otros factores, casi todos de naturaleza proteica. Muchos de estos factores son conocidos, pero estamos por cierto muy lejos aún de tener de ellos un conocimiento completo y detallado.

De todos modos, lo que sabemos es que se trata de una memoria inmediata muy precisa y potente. Si en una célula se decide que un determinado gen, una vez que se ha encendido, debe permanecer encendido, habrá en el ADN señales de diverso tipo que se lo recordarán a la maquinaria de la propia célula. Es

decir, no se debe recomenzar todo desde el principio: las decisiones tomadas en el pasado reciente quedan marcadas en cada región específica del cromosoma. Se trata de señales a cargo del ADN mismo o, mucho más probablemente, del ADN y de las proteínas que lo acompañan.

Por lo tanto, entonces, a cada instante el genoma toma en cuenta lo que está sucediendo alrededor y lo que ha sucedido anteriormente. El conjunto de estas señales, externas e internas, es el responsable directo de lo que sucederá. Por un lado está el ADN del genoma con sus conocimientos y su memoria histórica, por otro, el conjunto de estas señales y advertencias que condicionan constructivamente su acción.

Desde hace algunos años se da el nombre de epigenética al estudio de las múltiples indicaciones que llegan al ADN provenientes del mundo circundante y de su historia reciente, sobre cuya base el ADN mismo orienta su acción.

No estoy seguro de que haya habido necesidad de introducir este nuevo término, pero una vez que está en circulación, es necesario comprender bien su naturaleza. No se trata de genética pura y simple, porque muchas de las cosas que estudia la epigenética no

están escritas directamente en la secuencia del ADN, pero algo de genético hay en ello: porque de todos modos lo que está codificado en el ADN es lo que se ha de regular y poner en acción, y porque muchas de esas indicaciones son aportadas por moléculas que han sido a su vez especificadas por el ADN mismo, aunque cierto tiempo antes.

En la célula y en el conjunto de ADN y proteínas que constituye la parte más viva del cromosoma (y que suele recibir el nombre de cromatina), conviven moléculas que tienen una historia un tanto diferente: por un lado está el ADN, con su capacidad de especificar algo nuevo en todo momento, y por otro, las proteínas que fueron sintetizadas poco antes por ese ADN o por un ADN muy similar, que ha actuado en la célula progenitora.

En síntesis, todo está codificado en el mismo ADN, pero en momentos diferentes. En la célula hay, por ende, una duplicidad de dimensiones temporales: lo que vive en lo inmediato y lo que nació un poco antes, tal vez incluso generado por eso que ahora vive en lo inmediato. Veremos más adelante la magnitud de esta duplicidad de planos temporales, pero por lo que nos concierne aquí, la duplicidad asume un simple significado regulador: lo que ya existe puede

ser utilizado para señalar algo que puede tener importancia ahora, así como también para aquello que aún no existe.

Aun si dos organismos tienen el mismo, idéntico, genoma y, por lo tanto, el mismo programa potencial, es muy improbable que el programa se ejecute y realice del mismo modo en cada uno de ellos. Lo sabemos desde siempre, pero de todos modos queremos subrayarlo.

¿Qué es lo que nos modela? ¿Qué hace de nosotros lo que somos? Somos hijos de tres fuerzas o, mejor dicho, de un proyecto y de dos fuerzas. El proyecto es el genoma, característico de nuestra especie, pero a la vez nuestro y personal, un conjunto de estímulos y contraestímulos biológicos sugeridos con mayor o menor fuerza por nuestros genes y por su programa potencial.

Sabemos desde siempre que la realización de este proyecto está sujeta a las condiciones del ambiente circundante: dónde vivimos, cómo vivimos, qué comemos, qué enfermedades hemos contraído, qué encuentros hemos tenido, qué satisfacciones o frustraciones hemos enfrentado, qué hemos estudiado y así sucesivamente. Si hablamos de la influencia del ambiente en nuestra formación y en nuestra vida, debemos tomar en cuenta,

naturalmente, de qué edad estamos hablando. La influencia del ambiente es proporcional a la duración del período de vida transcurrido y lógicamente depende, sobre todo, de lo que nos haya sucedido a nosotros en primera persona. En pocas palabras, refleja bien nuestra biografía, considerada obviamente hasta el momento en el que estamos hablando. Proyecto genético y biografía son por lo tanto los dos principales componentes de lo que hizo de nosotros lo que somos. Pero esto no termina acá.

¿Qué otra cosa falta? Falta la acción sutil del azar, es decir, de ese conjunto de procesos puramente casuales que a cada instante interfieren con la acción de los otros dos componentes. En el intento de evaluar la respectiva contribución de los dos componentes principales en esta o aquella característica física o psíquica de los diferentes individuos, se hicieron en las últimas décadas diversas mediciones, utilizando las más variadas metodologías, y que fueron luego sopesadas y controladas.

Sin embargo, en cada caso el porcentaje de acción correspondiente a los genes sumado al que corresponde al ambiente no alcanzaba el 100%; siempre faltaba algo y a veces más que algo. ¿Qué era lo que no funcionaba? Simple: se había desestimado el componente

casual en la formación del cuerpo y de la mente de los individuos. Actualmente ya nadie duda con respecto a este fenómeno, pero es necesario hacer algunas aclaraciones.

Digamos ante todo que un hecho casual no es un acontecimiento sin una causa. Por cierto tendrá una o más de una, como todas las cosas de este mundo, pero nosotros no la conocemos, o porque es imposible o porque es difícil, o porque no vale la pena conocerla.

Es imposible conocer una causa únicamente en el caso de los fenómenos cuánticos, pero no es necesario apelar a los cuantos por un hecho biológico. Nada indica, al menos hasta hoy, que la explicación de los eventos biológicos más habituales exija una formulación rígidamente cuántica.

Una causa puede resultar difícil de identificar por una gran variedad de motivos, microscópicos o macroscópicos o, con mayor frecuencia, de ambos tipos. La mayoría de las veces, sin embargo, resultará esencialmente inútil determinar una causa porque es irrelevante o porque es demasiado complicado determinarla en relación a su importancia.

Si lanzamos al aire una moneda, esta caerá al suelo sobre una de sus dos caras; sobre cuál de ellas, depende

de muchas causas: la velocidad de partida, el ángulo, las condiciones del aire, el punto donde golpea en el terreno, etcétera. No es imposible determinar todas estas condiciones pero es muy arduo y, sobre todo, no vale la pena hacerlo: decimos entonces que el resultado del lanzamiento de una moneda es casual. Lo mismo vale para el lanzamiento de un dado.

Consideremos en segundo término la trayectoria de cada gota de agua en una cascada. En principio no es imposible de determinar, pero ¿qué importancia puede tener? Así también una determinada mutación que aparece en un individuo en particular tendrá por cierto una causa, pero en condiciones normales, no tiene ningún interés determinarla, incluso porque si encontramos la causa de ese cambio, se presentarán luego muchísimas otras.

Dicho esto, ¿dónde pensamos que puede intervenir el puro azar en los mecanismos de desarrollo de un animal superior? Prácticamente por doquier, tanto a nivel molecular como a nivel macroscópico, ya sea durante las primerísimas fases del desarrollo como en las fases más avanzadas.

A nivel molecular las determinaciones cuantitativas nunca son demasiado rígidas. No hay nada que pueda controlar si en una célula dada se producen 20 o 22

copias de una determinada proteína nuclear, pero en ciertas circunstancias esto puede contar, y con el tiempo los efectos de una diferencia como esta se suman y traen como consecuencia un efecto biológico. Así, el individuo que tenga células en las que se formaron 20 moléculas de una determinada proteína será diferente de aquel que posea células que contienen 22 copias: si resulta más o menos distinto, dependerá de muchas otras circunstancias, muchas de ellas tan aleatorias como estas. Podemos afirmar también que el desarrollo del embrión en este caso se encontró ante una bifurcación: si sucedía un determinado microevento, las cosas tomaban un rumbo, mientras que si se producía el microevento alternativo, todo se desarrollaba de otro modo.

También podemos imaginar que durante algún proceso precoz en una célula de un organismo una determinada proteína queda adherida al tracto de ADN que tiene que controlar, mientras que en la célula de otro organismo esa proteína se separa. Esta mínima diferencia, debida al azar, puede no tener ningún efecto, pero puede también producir una diferencia apreciable, que se manifiesta luego en una particularidad individual. También en este segundo caso se ha presentado una bifurcación, y hay quienes han tomado un camino y quienes han tomado otro diferente.

Todas estas pequeñas diferencias moleculares pueden generar minúsculas diferencias entre los individuos, que con el tiempo se acumulan.

Estamos aún en el reino de la epigenética, que estudia, ya lo hemos visto, cómo se controla la expresión de los diferentes genes durante las primeras fases del desarrollo, asegurando que todo siga el rumbo justo, pero provocando al mismo tiempo una serie importante de diferencias entre los individuos. Esta acción de diferenciación de los eventos moleculares comienza con los primerísimos procesos del desarrollo y prosigue a lo largo de todo el período del desarrollo y más allá. ¿Por qué motivo –si no es el azar– yo tengo por ejemplo el conducto auricular izquierdo más angosto que el derecho?

Existen innumerables eventos macroscópicos que ubican el desarrollo de un organismo frente a una bifurcación también en fases más avanzadas. Mucho se debe al hecho de que el desarrollo tiene tiempos definidos y, más aún, forzosos. Ciertos contactos y ciertas conexiones deben establecerse dentro de un marco temporal preciso ya que de otro modo nunca quedarán establecidos. Si las indicaciones provenientes del genoma y las que provienen de los estímulos ambientales son suficientes, todo quedará establecido

sobre esta base; pero si esto no sucede, será el azar que decida de cualquier modo, porque una decisión debe ser tomada necesariamente, y a corto plazo.

Para ser más precisos, supongamos que la conexión entre dos partes de un órgano en vías de desarrollo o entre dos órganos puede producirse más a la izquierda o más a la derecha, y que esta decisión no puede tomarse sobre una base determinista, es decir, genética o ambiental; será entonces el azar el que decida y la cosa quedará fijada, de modo irreversible. Así, estamos en presencia de otra bifurcación: si se toma un camino u otro depende del azar o, mejor dicho, depende en parte del azar.

Las bifurcaciones pueden tener lugar en cualquier zona del cuerpo, pero resulta particularmente interesante considerar el caso en el que estas se producen en el sistema nervioso o en el cerebro. En esta circunstancia el resultado de la bifurcación correspondiente nos parece de una importancia central, porque el funcionamiento del cerebro nos interesa muy especialmente y acicatea nuestra curiosidad. Esta situación, además, puede comprobarse en el curso de toda la vida porque el cerebro se desarrolla de manera continua.

En las fases precoces, pero de hecho durante toda la vida, una determinada célula nerviosa puede entablar

un contacto con otra a su derecha o a su izquierda. Muchos de esos contactos son contactos microscópicos que se denominan sinapsis. La decisión de entablar un contacto sináptico con la célula de la derecha o de la izquierda está en principio determinada, pero probablemente no en el 100% de los casos, de modo que cierto número de contactos se establecerá sobre una base casual. No podemos determinar a priori qué consecuencias tendrá esto, pero, sin duda, alguna tendrá.

En conclusión, las diferencias debidas al azar podrán ser físicas pero también psíquicas o mentales, y es fácil de comprender la envergadura de una contingencia como esta. Las diferencias entre un individuo y otro no pueden ser de tal magnitud que pongan en riesgo la vida o la integridad física de uno u otro, pero claramente pueden marcar su individualidad.

Para evaluar más a fondo la importancia de las pequeñas diferencias casuales, consideremos los cristales de nieve. Los copos de nieve tienen aproximadamente todos la misma forma –una simetría hexagonal– pero no existen dos cristales de nieve idénticos. ¿Por qué? ¿Por qué sucede esto, si la yuxtaposición de las moléculas de agua en fase de condensación sigue leyes físicas y químicas simples e inamovibles? Las leyes en

cuestión determinan rígidamente la forma general de cada cristal, pero el detalle, en cambio, es obra del azar, según si cada molécula cae de un lado en lugar de otro, con una velocidad o un ángulo en lugar de otro, en condiciones levemente diferentes de presión y de temperatura. Si a pesar de su simplicidad, y del hecho de que su formación depende de leyes absolutas e indefectibles, cada cristal de nieve es único y diferente a los demás, imaginemos, ¡qué podemos esperar de un ser viviente, tan complejo y regulado por principios mucho menos rígidos!

¿Y nosotros? Somos tan grandes y complejos y nos desarrollamos con tanta velocidad que ningún genoma podría controlar con rigor cada mínimo evento de nuestro desarrollo y de nuestra vida. Logra hacer mucho, obviamente, y todos tenemos una nariz, dos ojos, dos orejas, un corazón que funciona formado de un modo de preciso, pero no todo puede estar regulado. Y además hay una cuestión de objeto de estudio. En la vida nos interesa más lo que nos diferencia de los demás individuos que lo que nos asemeja a ellos. La alternativa sería un perfecto determinismo genético, que nadie quiere y por el que, antes bien, sentimos un profundo miedo. Si estuviéramos determinados por nuestros genes en todo y por todo, no habría

individualidad, es decir, la libertad de ser diferentes de los demás, aunque sea dentro de ciertos límites.

Por lo demás, nos complace ser diferentes y vamos por la vida orgullosos de nuestra irrepetible individualidad. Esa es una gran suerte. ¡Cuántas diferencias se observan incluso entre los integrantes de una misma familia! ¿Cuántas veces se ha observado que de una familia común y que nunca se destacó particularmente en nada puede nacer un individuo excepcional o un genio? Y, por el contrario, ¿cuántas veces de una familia de gran lustre nace alguien que vale muy poco y que incluso puede llegar a destruir la fortuna del propio linaje? Se trata de una especie de justicia distributiva superior, y uno de los argumentos más interesantes del estudio de las predisposiciones y de las dotes.

En suma, el proyecto genético responde a los estímulos del ambiente y todo el conjunto es acabado y finamente modelado por la acción solapada pero creativa del azar. El resultado es que cada uno de nosotros es diferente de los demás. Pensemos por ejemplo en el genio universal de Leonardo Da Vinci. Nadie en torno a él poseía dotes como las suyas, ¡ni siquiera de lejos! Lo mismo puede decirse de Dante, o Shakespeare, de Mozart o Rembrandt.

5. La integración de los diferentes niveles

Detengámonos ahora un momento a considerar el cuadro de conjunto de los fenómenos vivientes que, como hemos dicho, se articulan en diferentes niveles de organización. Hasta este momento nos hemos colocado en la perspectiva de un organismo que lleva a cabo la integración de todos los planos inferiores a él, desde los aparatos hasta los órganos, desde los tejidos a las células y desde las organelas celulares a las moléculas que las constituyen. Pero del mismo modo que un organismo no podría vivir sin las células que lo componen, tampoco su vida tendría sentido sin un cierto número de compañeros de ruta, de la misma especie o de especies diferentes. Para que su vida pueda constituir un acontecimiento de relevancia biológica, es necesario que exista al menos otro individuo de la misma especie con quien acoplarse y dar vida a una prole, aunque es obvio que esto no basta.

Los organismos de todos los tipos viven en grupos aun cuando no todos demuestren la misma inclinación

hacia la vida social. Podemos denominar grupo al conjunto de individuos de la misma especie con los que un determinado organismo mantiene mayor cantidad de interacciones y más duraderas. En algunos casos el grupo puede ser una realidad episódica y desagregada, incluso virtual, pero en otros casos representa, en cambio, una realidad más tangible. Para los así llamados insectos sociales y para los mamíferos superiores, el grupo constituye un punto de referencia esencial, una realidad imprescindible para la supervivencia y la educación. El animal hombre, en particular, hizo del grupo su universo necesario, sobre todo en el transcurso de los años de aprendizaje y de formación, al punto de que el grupo constituye para cada uno de nosotros el ambiente más auténtico en el cual vivir.

El conjunto de los distintos grupos de individuos de la misma especie que comparten un determinado territorio constituye una población. En ella los grupos se forman y se transforman continuamente y, al menos en principio, un organismo puede entrar en contacto con cada uno de los organismos de la población a la que pertenece. La población es una entidad delimitada en términos de espacio y de tiempo, pero desde el punto de vista biológico, del individuo se pasa directamente a la especie. La especie se define como el

conjunto de organismos semejantes que pueden acoplarse entre ellos dando vida a una prole no estéril, es decir, en condiciones de reproducirse ulteriormente.

Si queremos remontarnos a la raíz de la identidad de una determinada especie sólo podemos concluir que a cada especie le corresponde un genoma específico, claramente identificable más allá y por encima de las variaciones individuales. A pesar de esto, no parece ser la identidad del genoma lo que decide directamente acerca de la efectiva posibilidad de acoplarse entre los individuos de la misma especie.

El genoma de las diversas especies está organizado en estructuras cromosómicas diferentes en número y forma. En consecuencia, si el espermatozoide de una especie por casualidad fecunda la célula huevo de otra especie, por lo general nace de ahí una célula con un bagaje cromosómico altamente desequilibrado. A partir de esa célula casi nunca se origina un organismo, pero aun en el caso de que naciera algo, como por ejemplo en el caso de una mula, que nace del cruce de un asno y una yegua, este híbrido luego no se encuentra en condiciones de dar lugar a gametos vitales y viables, y por lo tanto no deja descendencia.

Sin embargo, en la naturaleza, la eventualidad de que un espermatozoide de una especie llegue a

fecundar la célula huevo de otra especie es extremadamente remota. En efecto, existen para cada especie una infinidad de barreras comportamentales que tienen como objetivo impedir que eventualmente eso suceda. Una gran parte de los así llamados ritos de cortejo tienen precisamente esa finalidad; cuando se llega al acoplamiento, no debería haber ninguna duda acerca de la pertenencia de los dos miembros de esa pareja a la misma especie.

Existen en la Tierra millones de especies diferentes. De insectos solamente, se conoce más de un millón de especies. Las especies vivientes son sólo una pequeña fracción de las especies que existieron a lo largo de la historia de la vida. Cada tanto, alguna especie se extingue y aparece alguna otra. El surgimiento de una nueva especie constituye un acontecimiento extraordinario que plantea formidables problemas al estudioso de la vida y de su historia.

La especie es una de las tantas categorías sistemáticas en las que nos subdividimos los seres vivientes. Un grupo de especies afines conforman un género, como por ejemplo el género *Canis*, el género *Felis* o el género *Columba*; un grupo de géneros afines se agrupa en una familia, como la de los cánidos, la de los félidos o de los *Muscidae*. Las familias, a su vez,

pueden ser agrupadas en órdenes (carnívoros, insectívoros, himenópteros o dípteros), y los órdenes, en clases (mamíferos, reptiles, insectos o arácnidos). La subdivisión taxonómica más elevada es la de los tipos o *phyla* en lo que respecta al reino animal, y la de las divisiones, en lo que respecta a las plantas. Estas últimas subdivisiones representan los tipos fundamentales de organización de los esquemas corporales y de las funciones biológicas de los organismos.

Este esquema se reveló sumamente útil para catalogar la gran cantidad de los seres vivos, pero mientras que la especie es una entidad biológica bien definida, ninguna de las otras categorías sistémicas, desde la familia hasta la clase, posee ningún significado biológico intrínseco. Se trata de agrupamientos convenientes, resultado de convenciones, y útiles sólo con fines didácticos o como sostén de la práctica del clasificador. Por razones de comodidad, además, pueden identificarse dentro de una especie algunas variedades o razas a partir del aspecto o la morfología de los diferentes grupos de individuos, pero tampoco estas subclasificaciones tienen significado biológico.

La especie, por lo tanto, es la entidad más abarcativa que puede identificarse en términos puramente

biológicos. Sin embargo, por su misma definición es una entidad abstracta que no puede no corresponder, por ejemplo, a una localización espacial: muchos individuos pertenecientes a una determinada especie pueden no encontrarse nunca durante el transcurso de sus existencias. La contigüidad física de los organismos, en cambio, es un aspecto fundamental de la vida en cuanto red de relaciones y de interacciones.

Queda claro que ningún organismo vive aislado fluctuando en el vacío sino que cada uno comparte con otros seres vivientes un determinado medio ambiente natural característico de un territorio dado. Ya hemos visto que los organismos de la misma especie que viven en una cierta área forman una población. Podemos decir ahora que los seres vivientes de las diferentes poblaciones que comparten la misma área conforman una comunidad. Se denomina ecosistema al conjunto formado por la comunidad de los seres vivientes presentes en un determinado territorio y por su ambiente inanimado, incluidos los diversos tipos de rocas y de tierra, de agua, de arena o de barro, caracterizados por parámetros físicos y químicos específicos.

Cada ecosistema representa, pues, un nivel de organización de gran extensión y generalidad, y una

entidad relativamente estable. Podríamos reiterar aquí lo que hemos dicho antes a propósito de los organismos: la relativa independencia de un ecosistema con respecto a las vicisitudes del resto del mundo está garantizada y sostenida por la estrecha interdependencia de todos sus componentes. Todos los ecosistemas presentes en nuestro planeta constituyen finalmente en su conjunto la biosfera, que representa el nivel supremo de organización biológica.

El concepto de ecosistema es muy útil para encuadrar todas las interacciones necesarias dentro de un conjunto heterogéneo y multiforme de seres vivientes, así como las relaciones que se establecen entre este y el ambiente natural que los hospeda. Cada ecosistema puede caracterizarse en términos de factores abióticos, referidos a la naturaleza del lugar, y factores bióticos, referidos las particularidades de los huéspedes vivientes. Entre los factores abióticos hay que considerar al menos la cantidad de luz disponible, la abundancia de agua, la temperatura del agua y/o del aire, la composición y la permeabilidad del terreno, y las variaciones diurnas y estacionales de estos parámetros. Los factores bióticos comprenden todo lo que constituye el objeto de estudio de la biología, con una particular referencia a las interacciones,

sobre todo tróficas –es decir, "qué come cada uno"–, entre los diferentes miembros de la comunidad de los seres vivientes.

En efecto, en cada ecosistema tiene que darse la presencia de organismos con diferentes exigencias y hábitos alimentarios, para asegurar el flujo de energía que ha de ser degradada y que los mantiene a todos con vida. En primer lugar deben existir los así llamados productores primarios, fundamentalmente plantas pero también algunos microorganismos unicelulares. Estos transforman directamente el dióxido de carbono del aire en material orgánico aprovechando la energía de la luz solar, que llega a la superficie terrestre a un ritmo de aproximadamente 200 calorías por metro cuadrado por segundo, u otras fuentes más sofisticadas de energía química.

Los vegetales constituyen el alimento de los animales herbívoros, que son los denominados consumidores primarios. Estos a su vez serán el alimento de los carnívoros, llamados consumidores secundarios, los cuales por su parte constituirán el alimento de otros carnívoros más grandes, llamados consumidores terciarios, y así sucesivamente hasta llegar a aquellos carnívoros tan grandes y escasos que no pueden nutrir a ningún otro organismo. Al final de esta cadena alimentaria se

encuentran los detritívoros y los descomponedores, organismos que se nutren de los compuestos orgánicos presentes en las sustancias orgánicas de desecho y en los cadáveres de los organismos muertos.

Los descomponedores son sobre todo bacterias y hongos microscópicos, mientras que los detritívoros pueden ser animales más grandes, como gusanos, camarones e insectos. De este modo el ciclo se cierra. De esta descomposición final no escapa nadie, ni siquiera aquellos animales que, como nosotros, por lo general no terminan siendo presa de ningún otro.

Junto a la ribera de un arroyo, por ejemplo, un productor primario, como una planta de vinca, puede ofrecer néctar para alimentar a una mariposa, el consumidor primario, que a su vez es capturada y deglutida por una rana, el consumidor secundario. Esta última puede transformarse en el alimento de una serpiente, que a su vez puede terminar como presa de un halcón que se comporta en este caso como consumidor cuaternario y final.

En un ecosistema, obviamente, no hay una única cadena alimentaria, sino muchas cadenas paralelas y parcialmente interconectadas de modo tal que llegan a formar una red alimentaria. Así la mariposa puede alimentar a una rana, pero también a un insecto

carnívoro de mayores dimensiones o un pájaro, y la serpiente se puede alimentar de la rana pero también de un pequeño roedor que puede a su vez ser presa del halcón. La estabilidad de un ecosistema se basa también en la complejidad de sus redes alimentarias. Si se registra alguna alteración a lo largo de alguna de las diferentes cadenas alimentarias, muchas otras en cambio permanecerán inalteradas y el conjunto reaccionará restableciendo el equilibrio original o alcanzando una nueva posición de equilibrio.

Las diferentes cadenas alimentarias, dado que en todos los casos deben ajustarse a las leyes de la física y la química, presentan características generales comunes. Es evidente, por ejemplo, que en cada sistema los depredadores no pueden ser más numerosos que sus presas y que es necesaria una gran cantidad de vegetación para saciar a un animal herbívoro de gran porte. Todo eso puede visualizarse fácilmente si se representa el número de los organismos correspondientes a cada nivel trófico de una determinada cadena con un rectángulo. De ese modo, se obtienen construcciones de forma piramidal cuya base ancha representada por una gran cantidad de productores primarios que sostienen y sustentan a todos los organismos pertenecientes a los demás niveles de la cadena alimentaria; el

vértice, estrecho, representa los pocos ejemplares de consumidores finales. Estas representaciones esquemáticas se denominan precisamente pirámides: una pirámide de cifras, otra de la biomasa, y finalmente una tercera de la energía.

En un determinado ecosistema ubicado en un prado, por ejemplo, pueden existir, en equilibrio entre ellas, 1.500.000 plantas de gramíneas, 200.000 pequeños roedores, 80.000 serpientes y 1 o 2 halcones. Como puede observarse, avanzando hacia niveles tróficos superiores, la cantidad de individuos se reduce progresivamente y al final termina siendo mínima. Podrían ofrecerse valores análogos para muchísimos otros ecosistemas, y la forma de la pirámide no cambiaría.

Sin embargo, no es la cantidad de individuos pertenecientes a los diferentes niveles tróficos el indicador más significativo. Los diferentes organismos no son todos de las mismas dimensiones. Así, si observamos un ecosistema presente en un bosque de grandes árboles, las cifras pueden resultar un tanto diferentes: 200 árboles grandes pueden albergar 150.000 insectos herbívoros, 100.000 insectos carnívoros y algunas aves. El punto es, evidentemente, que un árbol de gran tamaño es muchísimo más grande, es decir,

posee una biomasa mucho mayor que un insecto o incluso que un ave pequeña.

Por lo tanto, indudablemente más significativa resulta la pirámide de la biomasa, entendida como la medida de la masa corporal de conjunto de los organismos de cada nivel trófico. La forma piramidal aquí resulta casi inevitable. Por ejemplo, 100 miligramos por metro cúbico de plancton vegetal (fitoplancton) pueden sustentar en una determinada región del océano a 12 miligramos por metro cúbico de plancton animal (zooplancton) y 6 de peces.

En ciertas circunstancias, sin embargo, también la pirámide de la biomasa puede contener estratos temporariamente invertidos. Piénsese por ejemplo en un fenómeno como el crecimiento estacional imprevisto de una población específica. Durante cierto período esto puede generar una población más numerosa de lo esperable en teoría.

La que jamás puede ser invertida, ni en conjunto ni en parte, en cambio, es la pirámide de la energía, es decir, la representación de la cantidad de energía que pasa de un nivel a otro. Retomando el ejemplo del prado, vemos que las kilocalorías por metro cuadrado del nivel de las gramíneas se corresponden a las de los pequeños roedores, a las serpientes y a los halcones

como 6.000:100:10:1. Como consecuencia de todo lo que ya sabemos, es inevitable que se produzca una brusca caída en el flujo de energía al pasar de un nivel trófico al siguiente.

Desde este punto de vista, algunos pasajes son incluso desastrosos, y muchos organismos se comportan como máquinas de bajo o bajísimo rendimiento. En promedio, tan sólo el 10% de la energía de un determinado nivel trófico se transforma en biomasa del nivel siguiente. En el pasaje de los productores primarios a los consumidores primarios puede darse incluso que se transfiera solamente ¡el 1% de la energía!

Una de las consecuencias prácticas de la existencia de las pirámides ecológicas, sobre todo de las que tienen una pendiente muy empinada, es el denominado fenómeno de la bioconcentración. Si en el medio ambiente hay sustancias contaminantes, incluso en cantidades ínfimas, y estas no son degradadas por ningún organismo y pasan del cuerpo de la presa al del depredador, al ascender a niveles tróficos superiores inevitablemente su concentración se eleva, incluso un millón de veces.

La cantidad de organismos ingeridos a cada paso es, en efecto, enorme y se asiste a un fenómeno de concentración progresiva. Por este motivo en los peces

de ciertos mares o de ciertos ríos pueden encontrarse importantes cantidades de mercurio, plomo o DDT, aunque estas sustancias están presentes en las aguas en cantidades mínimas. El fenómeno presenta toda la importancia y la peligrosidad típicas de los fenómenos progresivos.

Los organismos vivientes pertenecientes a las diferentes comunidades interactúan entre sí de mil maneras diversas y sería imposible catalogarlas en su totalidad. Sin embargo, debemos citar al menos los tipos principales de relaciones que se establecen entre los individuos de las diferentes poblaciones en lo que respecta al grado de rivalidad y competencia, o de cooperación directa o indirecta. Estas relaciones van desde las formas de competencia más áspera, en las cuales ninguno de los dos organismos gana nada –puede pensarse por ejemplo en la lucha de plantas diferentes por alcanzar con sus raíces los escasos depósitos de agua existentes bajo las superficies desérticas o en el ataque de buitres y chacales a los cadáveres de los mamíferos muertos–, hasta las formas de protocooperación y mutualismo en virtud de las cuales aumenta la probabilidad de supervivencia de ambos organismos implicados.

A la protocooperación pertenece por ejemplo, la relación entre los picabueyes o bufágidos, pequeñas aves que viven sobre el lomo de los rinocerontes, y el propio rinoceronte: el pájaro libera a este de las garrapatas y de otros parásitos recibiendo a cambio protección, alimento y calor. Un ejemplo de mutualismo es, en cambio, la relación entre las termitas y los protozoos que viven en su intestino y que llevan a término para ellos la digestión de la celulosa contenida en la madera de los árboles y de sus raíces.

Entre estos dos extremos se ubican muchas otras formas de interacción entre individuos de poblaciones diferentes. Muchísimos organismos, por ejemplo, viven depredando a otros. La relación entre depredador y presa, llamada depredación, es una de las más interesantes y constituye el prototipo de los fenómenos biológicos que pueden estudiarse desde un punto de vista teórico.

Se sabe que el número de los depredadores y el de las presas presentes en un determinado ecosistema cambia continua y concertadamente. Se trata de un sistema relativamente estable pero sujeto a continuas oscilaciones. Una momentánea disminución de la población de las presas implica inevitablemente una disminución de los depredadores que no encuentran

alimento suficiente. La disminución de los depredadores da a la vez un poco de respiro a las presas y estas comienzan a aumentar en cantidad. Con un ligero retraso aumentan también los depredadores y así sucesivamente, según una dinámica muy bien estudiada y sujeta a una cantidad enorme de análisis, llevados a cabo utilizando instrumentos matemáticos e informáticos. En este marco se inscribe también la relación entre un herbívoro y las especies vegetales de las cuales se nutre.

Están, además, las variadas formas de parasitismo, en las cuales una especie vive, por decirlo de algún modo, explotando a otra, y el así llamado comensalismo, donde sólo se beneficia una de las dos especies involucradas pero sin que la otra sufra ningún daño. Un ejemplo de esto es la rémora, ese pececito que va adherido con una ventosa al vientre del tiburón y se alimenta de las migajas de su comida.

En todos estos casos no es imprescindible la convivencia estrecha de los individuos de las dos especies. En cambio, se habla de simbiosis cuando dos organismos conviven físicamente en una asociación muy estrecha. La relación simbiótica es transversal con respecto a las formas de competencia o de cooperación a las que nos hemos referido recién. Las dos especies que viven en simbiosis pueden sostener en algunas oportunidades

relaciones de parasitismo, comensalismo, protocooperación y mutualismo.

Existen innumerables ejemplos de simbiosis en las que participan tipos de organismos muy diferentes, como hongos y plantas, plantas y bacterias, hongos y algas, actinias y peces o medusas y algas. El ejemplo más frecuentemente citado es tal vez el de los líquenes, una asociación simbiótica de hongos y algas. Incluso en ambientes muy adversos, en los cuales ni los unos ni las otras podrían vivir solos, el alga lleva a cabo la fotosíntesis y ofrece compuestos orgánicos a la voracidad del hongo que coopera, a su vez, ofreciendo un reparo y conservado la escasa humedad disponible. En las tundras del Ártico los líquenes constituyen con frecuencia el primer nivel de una cadena alimentaria que incluso comprende a animales de grandes dimensiones como los caribúes.

Las mitocondrias, organelas de importancia fundamental en las células superiores, por ejemplo, se considera que derivan de una forma ancestral de simbiosis. En efecto se piensa que originalmente eran bacterias que vivían como huéspedes simbióticos dentro de algunas células eucariotas y que con el paso del tiempo perdieron su autonomía, volviéndose poco a poco parte integrante y esencial de la propia célula.

La comunidad de formas vivientes que habita un determinado ecosistema no es fija ni inmutable, sino que pueden observarse en ella variaciones estacionales o de largo plazo que involucran a casi todos los componentes bióticos. Se habla de sucesión cuando se hace referencia a uno de estos procesos de variación simultánea de los tipos de habitantes de un ecosistema. Si las variaciones estacionales, más pronunciadas en los climas más extremos, forman parte de la vida misma de cada ecosistema, más interesante aún resulta estudiar las sucesiones de comunidades que se instalan en territorios completamente nuevos –como nuevas islas volcánicas, nuevos deltas fluviales o nuevos lagos– o en territorios que han sido alterados violentamente por incendios, huracanes, inundaciones, graves sequías, o nuevos asentamientos humanos.

En muchos de estos casos se observan fenómenos típicos y ya muy bien estudiados. Primero el territorio es ocupado por un cierto tipo de comunidad que oficia de algún modo de pionera. Luego esta es sucedida por otro tipo de comunidad que, a su vez, puede ser reemplazada por otra. Se trata de una serie particularmente interesante de acontecimientos que ilustran la profunda integración del ambiente físico con las especies vivientes que se van a alojar progresivamente en él.

Si del nivel de las poblaciones y de sus interacciones descendemos al de cada organismo individual, para dar un panorama completo debemos introducir otro par de conceptos, el de hábitat y el de nicho ecológico. El hábitat es el espacio físico donde un organismo vive y se reproduce, mientras que el nicho es su hábitat sumado al conjunto de las condiciones necesarias para su supervivencia, que derivan de sus necesidades fundamentales y también de sus costumbres y de su estilo de vida. Estas condiciones incluyen el espacio físico, caracterizado por cierto número de parámetros de naturaleza inorgánica como la temperatura y el grado de humedad, y también el conjunto de aquellos organismos que componen su medio natural.

El conjunto de los variados ecosistemas presentes sobre la Tierra constituye la biosfera. Es pertinente considerar cuán reducido es el espacio físico ocupado por la vida. Se trata de una capa de un espesor de poco más de veinte kilómetros, desde su punto más alto al más profundo, que envuelve la superficie de nuestro planeta y que comprende porciones de la hidrosfera, la litosfera y la atmósfera. La hidrosfera, el conjunto de las aguas de los océanos, mares, lagos, pantanos, ríos y arroyos, aloja la mayor parte de las formas vivientes.

Las especies viven por lo general en aguas poco profundas que se extienden a lo largo de las costas, donde penetra una cantidad de luz solar que provee la energía para la fotosíntesis.

Del mismo modo, la mayor parte de los organismos terrestres vive sobre la superficie o en las proximidades de la superficie de la litosfera, el conjunto de las rocas y de los varios tipos de terreno que constituyen las tierras emergidas. Finalmente, en la atmósfera viven algunos organismos hasta una altura de aproximadamente 7.000 metros. Algunas rarísimas muestras orgánicas pueden hallarse también a alturas superiores, y algunos detritos pueden depositarse en el fondo de los océanos. El espesor de la biosfera, por lo tanto, no es uniforme y puede presentar algunas variaciones entre una localización y otra.

En este delgado estrato, no más que una película para nuestro planeta, se encuentran todos los organismos vivientes que conocemos, subdivididos en varios millones de especies diferentes. Estos organismos constituyen la biomasa terrestre, correspondiente a un total de cerca de 10^{30} células, una cifra equivalente a la contenida en varios millones de miles de millones de seres humanos. Por fuera de la biosfera no hay vida, y no puede haber vida salvo en condiciones extraordinarias producidas

por el hombre, como por ejemplo las que se generan dentro de una nave espacial.

Ni la materia ni la energía se crean o se destruyen, pero mientras que la energía llega a la Tierra en grandes cantidades, proveniente fundamentalmente del Sol y se irradia nuevamente al espacio cósmico en la misma proporción, jamás se agrega materia nueva a nuestro planeta, ni sale de él. Los átomos de la biosfera son por lo tanto más o menos siempre los mismos, y los que están presentes en los organismos vivientes del presente son probablemente los mismos que pertenecieron a los organismos del pasado. Por este motivo los elementos constitutivos de la materia orgánica deben ser continuamente reciclados.

Todos los elementos químicos, en primer lugar los más abundantes, son reutilizados continuamente en los grandes ciclos biogeoquímicos. Los productores primarios introducen diferentes elementos químicos en el ambiente biótico, incorporándolos en compuestos orgánicos, mientras que los consumidores y los descomponedores los restituyen al medio abiótico, degradando las moléculas orgánicas complejas hasta reducirlas a moléculas inorgánicas simples.

Y luego, el ciclo recomienza. La velocidad con la que los distintos elementos son reciclados puede variar

mucho según si se trata de ciclos gaseosos, que afectan a la atmósfera y la hidrosfera, o de ciclos sedimentarios que se dan a través del suelo y las rocas. Los ciclos gaseosos, como el del agua, el del carbono o el del nitrógeno, se desarrollan con mayor velocidad y juegan un papel primario, pero es necesario que sean reciclados del mismo modo los demás elementos, aunque eso suceda a un ritmo más lento.

Consideremos por ejemplo el fósforo. Este elemento está presente en cada célula viva y es esencial para el metabolismo, la regulación, la codificación del patrimonio genético y los intercambios energéticos. Este elemento químico muy rara vez se presenta en forma gaseosa y su ciclo es muy lento. La mayor parte del fósforo inorgánico está contenido en diferentes depósitos rocosos, de los cuales se desprende por erosión o por el arrastre de las lluvias que llevan a la formación de fosfatos. Las plantas y los demás productores primarios introducen entonces el fósforo en varios compuestos orgánicos que luego son asimilados por los consumidores. Los descomponedores, finalmente, demuelen estos compuestos y liberan fosfatos que pueden ser reabsorbidos por las plantas o lavados, perdiéndose así en el terreno y formando nuevos sedimentos. Una buena parte del fósforo presente en los seres vivientes deber

ser continuamente recuperada, y este elemento constituye un factor limitante para muchos ecosistemas.

El ser viviente se comporta en casi todos los niveles de organización del modo más autónomo posible y constantemente busca oponer resistencia a los cambios externos. Hemos visto que en principio la célula trata de adaptarse lo más posible a los cambios de las condiciones externas sin perder su propia identidad y funcionalidad, aunque su poder en este sentido es, sin embargo, muy limitado. En cambio, el organismo pluricelular se encuentra en mejores condiciones de mantener su equilibrio interno independientemente de las variaciones externas.

Es el ecosistema, sin embargo, el que representa el triunfo de la estabilidad a través del cambio y del constante reordenamiento. Y más aún la biosfera como conjunto de ecosistemas. La introducción forzada de nuevos elementos puede producir a veces una regresión hacia las condiciones de partida, o provoca una serie de acontecimientos que conducen a resultados diferentes de los que podían preverse.

La biosfera tiene una estabilidad notable, una cierta reactividad y en ella se producen importantes eventos cíclicos. Esto puede contribuir a responder a una pregunta raramente explicitada, pero de capital

importancia: ¿por qué la vida, a partir de lo que sabemos, nunca se ha extinguido? Si hubiera sido así, todo lo que estamos diciendo se habría esfumado, probablemente para siempre. La respuesta no la sabemos, pero una explicación válida puede hallarse en lo que recién hemos dicho: en su conjunto la biosfera muestra una gran estabilidad y capacidad de reaccionar ante los cambios, sobre todo los más bruscos. Obviamente no existe ninguna póliza que nos dé seguridad acerca del futuro, pero podemos decir que hasta ahora no ha sucedido. Y esto no es poco.

6. La llama y el espejo

La excepcional cohesión interna del fenómeno vida y la estrecha interdependencia de todos sus componentes queda a la vista. Pero este no es más que un aspecto de su unicidad. Por encima de esto está su continuidad. Si en el espacio de las funciones y casi en la dimensión del espacio propiamente dicho no hay lagunas ni interrupciones, en la dimensión del tiempo estamos forzados a ver la vida como un bloque único, monolítico e indestructible. Cada fenómeno biológico pertenece a un único acontecimiento histórico, la vida, que avanza sin interrupciones ni intermitencias desde hace casi cuatro mil millones de años.

Cada ser viviente deriva de otro ser viviente y comparte con él muchas de sus características esenciales: una muy específica composición química y su articulación en macromoléculas, el difundido empleo de reacciones enzimáticas, la estructuración en células, la existencia de precisas relaciones jerárquicas entre los procesos y la codificación de programas, un

empleo particularmente atento de la energía o, mejor dicho, de la energía libre, para citar tan sólo los más relevantes. Muchos de estos elementos distintivos no son simples curiosidades sino que juegan un rol vital, más de lo que estamos dispuestos a pensar, y tienen que ser preservados en su continuidad.

Todos los acontecimientos del mundo tienen en realidad una continuidad; el tiempo no se detiene nunca y carece de lagunas. Una montaña o una extensión de arena tienen continuidad pero no se fragmentan en una pluralidad de eventos todos del mismo tipo aunque diferentes, como sí en cambio lo hace la vida, que mantiene sorprendentemente su especificidad a través del cambio y la diversificación.

El núcleo esencial de esa continuidad se pone de manifiesto en el modo elegante y desenvuelto con el que la vida crea orden, tomándose casi como un juego la tendencia universal al desorden. Esto se presenta como una marca inconfundible que se transmite de individuo a individuo a través de las generaciones, perpetuando una separación neta entre lo que está vivo y lo que no lo está.

La vida es algo así como una llama que quema, que se autoalimenta y no se detiene nunca. Mi vida, la del perro de la esquina o la de los árboles de la avenida

forman parte del mismo acontecimiento, son diferentes episodios del acontecimiento vida que se han encontrado aquí y ahora.

Esto, si lo pensamos bien, es mucho más que el conjunto de enseñanzas que derivan de la teoría evolucionista que tanto impactó en su momento y tanto impacta aún ahora. No sólo derivamos todos del mismo grupo de organismos vivientes originarios, sino que derivamos de ellos por derivación física directa.

El vínculo puede ser de estrecha cercanía o más remoto, pero se trata de un vínculo de continuidad física que va mucho más allá del vínculo de continuidad genética del que hemos hablado hasta este punto. Es una verdadera continuidad física que, si se interrumpe, no recomienza. Todo fenómeno biológico es continuación de otro; no hay una pausa –un acontecimiento no orgánico que se interponga entre los dos– porque probablemente sería imposible. Entre la vida y la vida hay solamente vida.

No es fácil comprender un discurso como este porque toma en consideración períodos de tiempo muy extensos y porque lo que estamos definiendo como un acontecimiento único comprende en realidad generaciones y generaciones de individuos, puestos uno junto al otro, o alineados a lo largo del

tiempo. Y sin embargo entre el ornitorrinco y yo hay una continuidad física antes que genética. Si esta se interrumpiese, uno de los dos no estaría, o tal vez no habría absolutamente nada.

Al hablar en general del desarrollo de los fenómenos materiales se enuncian leyes universales como la ley de gravedad o la de inercia, pero cada fenómeno tiene también sus condiciones particulares que podemos denominar condiciones iniciales. Por ejemplo, si observo la caída de un vaso desde una mesa, la ley de gravedad es siempre la misma, pero una cosa es un vaso que cae desde una mesa baja, otra si cae desde una mesa alta, si es muy pesado o liviano, si es irrompible o si se puede romper, si se cae porque yo lo lancé o estando quieto. En todos estos casos las leyes son las mismas, pero en cada oportunidad cambian las condiciones iniciales, es decir, cómo estaban las cosas en el momento cero (lógicamente lo que definimos como tiempo cero es arbitrario porque no existe un tiempo cero absoluto, sino que llamo tiempo cero al momento a partir del cual comienzo a interesarme por el fenómeno).

La biología, se dice, es una ciencia histórica, porque la vida cambia a lo largo del tiempo y se ve profundamente

condicionada por su propio pasado. El hecho es que para un fenómeno inanimado son tan importantes las leyes como las condiciones iniciales, mientras que si se trata de un fenómeno animado las condiciones iniciales son muchísimo más importantes y más condicionantes que las leyes mismas, si podemos decirlo de este modo. Cualquier planta o animal que se está desarrollando se encuentra sujeto a las mismas leyes físicas y químicas, pero queda claro que es muy diferente si crece a partir de una bellota o de un huevo de libélula.

A la par de las leyes físicas lo que cuenta acá son las condiciones iniciales, representadas principalmente, aunque no de manera exclusiva, por el genoma. La bellota se forma a partir de un genoma de bellota, así como el chimpancé lo hace a partir de un genoma de chimpancé. El hombre por su lado, desde el inicio, lleva consigo su genoma humano.

La vida es, entonces, un conjunto de fenómenos naturales en los que son casi más importantes las condiciones iniciales que las leyes. De hecho, casi no se enuncian leyes en biología, sino que la mayor parte de las veces se hace una narración; se relata aquello que en otra época se denominaba "historia natural": la historia natural de un tipo particular de planta o

de animal. En todos los ejemplos que podemos enumerar lo que cuenta son las condiciones iniciales, que conciernen a la célula de la que se parte y, sobre todo, al genoma que esta contiene.

Se afirma con frecuencia que todas las especies hacen una contribución fundamental a la vida en el mundo; que las vidas de todas las especies están correlacionadas y que si alguna de ellas faltase, aunque sólo sea temporariamente, se producirían graves desequilibrios en todo el planeta. Esto es cierto, y hemos hablado de esto también aquí, pero siguiendo este razonamiento, parecería que la vida estuviera hecha solamente de acontecimientos estrechamente interconectados. Es verdad, la vida está hecha de acontecimientos estrechamente interconectados, pero es aún mucho más.

Si las plantas no fijaran la luz del sol produciendo azúcares complejos y liberando oxígeno en la atmósfera, los animales no podrían comer ni respirar y sería una catástrofe inmensa. Lo mismo puede decirse con respecto a muchas bacterias y a las algas verdes. Si las bacterias del fondo del océano no nacieran y murieran a un ritmo increíblemente acelerado, no habría suficiente cantidad de sustancia orgánica para alimentar el ciclo del carbono, que hace funcionar todas las cosas

del mundo. Todo esto sin embargo demuestra tan sólo que la vida está hecha de gran cantidad de fenómenos interconectados.

Lo que afirmamos ahora implica dar un pequeño paso más hacia adelante. La vida es un episodio único que, por los acontecimientos históricos que se fueron sucediendo, se articuló en tantos episodios, ambientes y campos diferentes que efectivamente interactúan entre sí, pero permaneciendo siempre como una unidad.

La bacteria que produce oxígeno es un episodio de la historia de la vida que se vuelve útil, por así decirlo, también para muchos animales, el hombre incluido. Pero antes de ser algo así, formaba parte del mismo único episodio, del mismo fuego, que puede subdividirse en muchos fuegos más pequeños y diferentes, pero que se originó, se alimentó y sigue alimentándose del mismo episodio único y central.

Desde un punto de vista abstracto o, mejor dicho, desde el punto de vista de la física y de la química del universo, la vida es sólo un experimento, es un único acontecimiento de este planeta que, por suerte para nosotros, sigue funcionando desde hace tanto tiempo y no parece estar por agotarse, al menos por el momento.

Es difícil pensar que las propiedades características de la vida se hayan modificado en cada oportunidad,

aprovechando condiciones particularmente favorables. En cambio, resulta más razonable pensar que, una vez adquiridas, estas se mantuvieron y perpetuaron transmitiéndose de organismo en organismo, de generación en generación, según una línea de continuidad excepcional: las condiciones iniciales de cada organismo viviente hacen de él un organismo viviente sin ambigüedades.

De este modo, no estamos obligados a recomenzar siempre desde el principio; cuando el óvulo que nos dio origen fue fecundado por el espermatozoide del que somos hijos, no tuvo que comenzar de cero y atravesar todas las vicisitudes de estos cuatro mil millones de años, porque llevaba algo en sí, que era una especie de resumen de los capítulos anteriores y que nosotros llamamos genoma. Al ver la vida así, como un episodio único, el genoma asume por lo tanto una nueva dimensión. Es el instrumento principal de la continuidad no solamente genética, como ya lo sabemos desde hace mucho tiempo, sino también física de los diferentes episodios de ese acontecimiento único.

¿Cómo es posible que un nuevo organismo, cada nuevo organismo, se mantenga en comunicación con siglos y siglos de acontecimientos biológicos anteriores y se beneficie de ellos? ¿De qué modo puede entrar

en contacto físico con todo esto, es decir, con lo que hemos denominado la llama de la vida? Además de vivir en una cierta atmósfera y gozar de las ventajas indirectas que derivan de la presencia de la vida sobre la Tierra, todo lo que liga directamente a un nuevo organismo superior con la vida pasada es una célula, la célula a partir de la cual se desarrolla. La continuidad con el pasado se establece a través del "cuello de botella" representado por esa célula, que en el caso de los animales es la célula huevo fecundada, es decir, la cigota.

Para ser más exactos, la célula a partir de la cual se desarrollan los organismos de reproducción sexual, es decir, la cigota, deriva de la unión de dos gametos, dos cuasicélulas, portadoras cada una de un cuasigenoma o, mejor dicho, un semigenoma. En este caso, aun cuando la cigota sigue siendo el vínculo indiscutible con el pasado, los gametos vinculan al nuevo individuo con dos historias biológicas diferentes, no con una sola. Y esto refuerza el lazo con la vida en su conjunto.

Podría objetarse que la reproducción no sucede siempre con esta modalidad, pero siempre se pasa a través de una célula para avanzar de una generación a la otra. Puede darse entonces que todos los organismos estén hechos de células precisamente porque

una célula constituye el mecanismo de pasaje obligado entre las generaciones, es decir, entre un individuo y el pasado de la vida. Y además la célula, se sabe, representa la entidad vital mínima, el hilo conductor del evento vida.

La continuidad de la vida tiene lugar también gracias a una serie de desfases temporales. Observemos la célula de un organismo: vive a la luz de su propio genoma y todo su comportamiento se inspira en sus dictados, pero el genoma no es fijo sino que sabemos que con el tiempo cambia y evoluciona. Buena parte del fenómeno vida gira en torno a esta articulación en tiempos diferentes: el de la vida individual y el de la vida en general. El eslabón de unión está representado por el ADN, que permanece estable durante períodos relativamente breves y cambia en tiempos más extensos.

Es el ADN lo que vincula una generación con la otra y lo que asegura, al mismo tiempo, la continuidad de las diferentes historias. Debe notarse también que en lo inmediato esto se realiza en dos de ellas: opera dentro de una estructura celular que es hija suya, aunque puede haber un ligero desfase temporal entre el ADN mismo y sus productos. A corto plazo el

ADN por sí solo no alcanza. Es necesaria también una estructura celular que haya sido construida a partir de las indicaciones contenidas en el genoma mismo, pero en plazos ligeramente diferentes. Así entonces la continuidad de la vida está respaldada y, más aún, garantizada por esta segunda doble división temporal: la célula y su ADN tienen habitualmente dos fechas de nacimiento diferentes.

Si en este momento observo una célula cualquiera de mi cuerpo, veo que contiene un genoma que cambia con una excepcional lentitud, llevando en sí el recuerdo de acontecimientos inimaginablemente lejanos en el tiempo, pero también un cierto número de estructuras mucho más recientes: las proteínas, las organelas, la membrana celular, que fueron hechas ayer o hace un mes.

Ambas realidades son necesarias porque el ADN debe interactuar con la célula, ya que esta fue hecha sobre la base sus indicaciones y sin ADN no sabe hacer nada. De este modo no hay rupturas, y no hay rupturas precisamente porque la escala de los tiempos del ADN es larguísima, mientras que la escala temporal de las proteínas es relativamente breve o brevísima. Las estructuras celulares, en suma, son hijas del ADN, pero no del ADN de este instante; son hijas del ADN de ayer, de antes de ayer o de hace un mes. No necesitan

volver a partir de los dictados del ADN a cada momento, porque ya están conformadas. Este desfase temporal entre el ADN y sus productos, esenciales para la supervivencia, es una de las características más interesantes del fenómeno vida.

El acontecimiento vida aparece dividido en muchos episodios, algunos más relacionados entre sí, otros menos, pero podemos pensar que es un único suceso que comenzó en aquel momento y que nunca más se vio interrumpido avanzando a través de una enorme cadena de portadores de la antorcha. Muchas especies han desaparecido, muchas líneas evolutivas se han extinguido por así decirlo y ya nunca más recomenzaron porque la evolución no recorre nunca dos veces el mismo camino. Sin embargo, el acontecimiento en su conjunto siguió su marcha hacia adelante. La mayor parte de los seres vivientes, que –no lo olvidemos– son las bacterias, siempre avanzó. En cambio, y formulando una hipótesis siniestra, si por algún motivo se hubiera interrumpido, no habría recomenzado nunca más, y ya no habría más vida.

Es el genoma el que asegura y lleva a cabo la continuidad –al menos desde el punto de vista de la información, representando un verdadero resumen de todo lo sucedido hasta un instante antes–, y el que toma

materialmente el lugar de miles y miles de hechos biológicos pasados.

Para concluir, es necesario explicar la metáfora de la llama, que por cierto no es nueva. Una vez encendida, la llama se mantiene al menos mientras tiene material para arder. La llama, para encenderse, necesita condiciones particulares de ventilación y de temperatura, que luego ella misma se encarga de mantener. Existe por lo tanto un "umbral" superado el cual la llama se mantiene y se autoalimenta, así como la vida, que una vez que encontró su cifra, avanzó y avanza aún hoy, manteniéndose coherente consigo misma.

También el fenómeno general, el acontecimiento vida en su conjunto, habrá tenido en su momento ciertas condiciones iniciales propias, que acompañaron sus comienzos. Salvando el hecho de que no las conocemos bien, estas condiciones de todos modos respondieron a una doble serie de vicisitudes. Por un lado tuvieron una importancia fundamental para permitir que la vida misma tuviera ciertas características y no otras. Por otro, estas primeras condiciones iniciales fueron luego reemplazadas y casi olvidadas por el conjunto de aquellas que fueron estableciéndose después como condiciones iniciales de la vida.

Entre ambas afirmaciones no hay contradicción. En primer lugar, porque desde entonces ha pasado muchísimo tiempo y, en segundo lugar, porque los organismos vivientes han establecido muy pronto sus propias y complejas condiciones iniciales, fruto de la densa red de relaciones que las caracteriza. Desde hace tiempo esas son las que cuentan, y de ellas hemos hablado.

Es cierto que hubo un inicio, que puede ubicarse 3.800 millones de años atrás, aunque desconocemos las características de ese acontecimiento capital. Además, queda claro que desde que se formó la primera célula esta inició su propia evolución según los esquemas que ya hemos explicado aquí varias veces.

En realidad, es perfectamente concebible que haya habido una cierta cantidad de inicios diferentes, separados entre sí por un período de tiempo no demasiado extenso. Habrá habido probablemente una serie de pruebas, muchas de las cuales fracasaron y que se sucedieron en un breve lapso de tiempo; cuán breve, no lo sabemos, pero ciertamente pequeño con respecto a cuatro mil millones de años.

Desde entonces muchas formas de vida se han sucedido, cubriendo la Tierra con los organismos más diversos. Después de haber dado lugar a innumerables

lenguas de fuego, en un cierto punto la llama de la vida produjo una, especial, que estuvo en condiciones de estudiar a las demás, de conceptualizar y de dar nombres a las cosas. Y en ella se reflejó la vida.

No puedo afirmar si el mundo se ha percatado de nuestra presencia, pero el punto es que nosotros sí hemos tomado plenamente conciencia de él, cualquiera que sea el significado que esto tenga. Para una mente soberana e independiente, sobre la Tierra se encendió tan sólo un fuego más entre tantos, pero este fuego ha sido capaz de reflejar el mundo entero. La evolución se replegó sobre sí misma volviéndose reflexiva. La materia a partir de ahora puede reflejarse a sí misma y ser captada en un universo de sentido. Apareció una criatura que, aun siendo la "quintaesencia del polvo", logra decir, con palabras de Shakespeare, "podría terminar confinada en una cáscara de nuez y considerarme el rey del espacio infinito".

No sabemos si el mundo es cognoscible en sí mismo, ni tampoco si puede ser observado de algún otro modo prescindiendo de la presencia del hombre. Nosotros lo vivimos y lo contemplamos a nuestro modo, combinando un acercamiento objetivo, dentro de lo posible, con elementos subjetivos, perceptivos y conceptuales, algunos de ellos memorizables y

comunicables mediante un lenguaje articulado que poseemos de manera exclusiva. Al menos desde nuestro punto de vista, la aparición de la especie humana tiene una importancia especial, y cambia completamente el cuadro de los acontecimientos.

Desde nuestra perspectiva, con la aparición del hombre, la evolución biológica alcanzó su punto máximo. Se trata por cierto de una interpretación antropocéntrica y por lo tanto muy poco objetiva, pero es una interpretación de la cual es difícil prescindir porque nosotros somos nuestra cultura, sostenida por nuestra natural propensión a observar atentamente todo lo que nos rodea, y transformarlo o trascenderlo. Y, por otra parte, yo mismo formo parte del cuadro que quiero representar.

¿Y ahora? ¿Qué viene a continuación? ¿A qué niveles llevará el hombre los resultados de su arrolladora evolución cultural? Desde ya que no podemos saberlo pero el argumento más candente en la actualidad está vinculado con todo lo que estamos diciendo y, en particular, con la posible interferencia de la evolución cultural de nuestra especie con su evolución biológica. En efecto, a menudo se habla de modificar conscientemente nuestro genoma: esta empresa, sostenida

y permitida por nuestra evolución cultural, debería incidir directamente en la biológica.

Tenemos los conocimientos teóricos y los instrumentos técnicos para dar ese paso, aunque no sabemos aún si nos embarcaremos en esta otra aventura ni cuándo. El genoma puede ser modificado dentro de las células del cuerpo (modificación somática) o directamente en la línea germinal, es decir, en las células que permiten la producción de los gametos. La primera operación modifica temporalmente a una u otra célula, pero nada de eso se transmite a los descendientes, mientras que en el caso de la modificación germinal, los resultados se transmiten a los hijos y a todos sus descendientes.

En 1975 un grupo de biólogos moleculares se reunió en Asilomar, en California, para discutir acerca de las posibles aplicaciones de la nueva biología, y se decidió que en el hombre sólo se llevarían a cabo experimentos de modificación génica somática y no germinal, como en cambio sí se hizo y se hace con muchas otras especies. Esta suerte de moratoria permitió que hasta ahora nunca se haya llevado a cabo esa experiencia y que se haya hablado muy poco de ello. Pero han pasado más de treinta años y las cosas han cambiado. Por ejemplo, sabemos mucho más que

entonces sobre la biología del envejecimiento y sobre muchas patologías hereditarias o semihereditarias. Por lo tanto, no es nada improbable que más tarde o más temprano, ese tema vuelva a estar presente.

¿De qué modo se podría insertar un acontecimiento como este en la historia del proceso planetario que estamos delineando? Ya dije que a la aparición del hombre le correspondió la aparición de un enésimo fuego que cambió radicalmente la perspectiva del conjunto, pero no a nivel material sino tan sólo en un plano conceptual y reflexivo, al menos aparentemente. En cambio, una eventual modificación en el genoma realizada por nosotros mismos tendría consecuencias concretas y tangibles incluso a nivel material.

¿Cómo podríamos entonces encuadrar el fenómeno? Depende desde qué punto de vista nos ubiquemos. Visto de lejos, en realidad no hay nada nuevo: cada especie influyó desde siempre, poco o mucho, directa o indirectamente, sobre su propio camino evolutivo. Visto de cerca, no puede dejar de advertirse una especie de cortocircuito o, si se prefiere, de *loop* de la evolución sobre sí misma: la evolución biológica condujo a una especie a desarrollar una poderosa evolución cultural que a su vez podría acabar por darle una nueva dirección a su propia evolución

biológica, a sabiendas y a conciencia. La clave de todo esto está en la expresión "a conciencia". En efecto, son imprescindibles una profunda conciencia, y cautela. La aparición del hombre ha hecho que algunos seres vivientes tengan una alta conciencia de sí mismos y de las cosas del mundo y esos futuros acontecimientos podrían ponerla en riesgo o hacerla desaparecer del todo.

Bibliografía aconsejada

Introducciones de carácter general, con observaciones biológicas, físicas y filosóficas

Boncinelli, Edoardo, *Prima lezione di biologia*, Roma-Bari, Laterza, 2007. Libro de nivel elemental.

Jacob, François, *La logica del vivente. Storia dell'ereditarietà*, Turín, Einaudi, 1971 (trad. cast.: *La lógica de lo viviente, una historia de la herencia*, Barcelona, Tusquets, 1999). Junto al libro siguiente, dos clásicos del pensamiento biológico.

Monod, Jacques, *Il caso e la necessità. Saggio sulla filosofia naturale della biologia contemporanea*, Milán, Mondadori, 1970 (trad. cast.: *El azar y la necesidad*, Barcelona, Tusquets, 1981).

Schrödinger, Erwin, *Che cos'è la vita? la cellula vivente dal punto di vista fisico*, Milán, Adelphi, 1995 (trad. cast.: *¿Qué es la vida?*, Barcelona, Tusquets, 1983). Escrito en 1944, aún puede ser leído con provecho.

Un texto general de referencia

Campbell, Neil A. y Reece, Jane B., *Principi di biologia*, Milán-Turín, Pearson Benjamin Cummings, 2010 (trad. cast.: *Biología*, Madrid, Editorial Médica Panamericana, 2007).

Introducciones a la genética

Boncinelli, Edoardo, *I nostri geni. La natura biologica dell'uomo e le frontiere della ricerca*, Turín, Einaudi, 1998. Libro que comienza de manera elemental, pero que se desarrolla luego con notable amplitud. Próximamente se publicará la nueva edición.

Strachan, Tom y Read, Andrew P., *Genetica molecolare umana*, Bolonia, Zanichelli, 2012 (trad. cast.: *Genética molecular humana*, Barcelona, Omega, 1999). Texto muy avanzado, pero claro.

Sobre el genoma, dos textos elementales, pero completos y complementarios

Boncinelli, Edoardo, *Genoma. Il grande libro dell'uomo*, Milán, Mondadori, 2001.

Ridley, Matt, *Genoma. L'autobiografia di una specie in ventitré capitoli*, Turín, Instar, 2002 (trad. cast.:

Genoma. La autobiografía de una especie en 23 capítulos, Madrid, Taurus, 2000).

Una amplia introducción a la bioquímica

Berg, Jeremy M., Tymoczko, John M. y Stryer, Lubert, *Biochimica*, Bolonia, Zanichelli, 2010.(trad. cast.: *Bioquímica*, Barcelona, Reverte, 2007).

Introducción a la biología molecular

Karp, Gerald, *Biologia cellulare e molecolare. Concetti ed esperimenti,* Nápoles, EdiSES, 2012. (trad. cast.: *Biología celular y molecular,* Madrid, McGraw Hill Interamericana, 2011).

Watson, James, *Biologia molecolare del gene*, Bolonia, Zanichelli, 2009 (trad. cast.: *Biología molecular del gen*, Madrid, Editorial Médica Panamericana, 2006). Un texto ya clásico.

Introducción a la biología del desarrollo

Boncinelli, Edoardo, *Biologia dello sviluppo. Dalla cellula all'organismo*, Roma, Carocci, 2001. Elemental pero no superficial.

Gilbert, Scott F., *Biologia dello sviluppo,* Bolonia,

Zanichelli, 2012 (trad. cast.: *Biología del desarrollo*, Madrid, Editorial Médica Panamericana, 2005). Trata de las más recientes actualizaciones sobre el tema.

Energía e información

Atkins, Peter W., *Le regole del gioco. Come la termodinamica fa funzionare l'universo*, Bolonia, Zanichelli, 2010. Simple y profunda introducción a la termodinámica y a su rol en el universo.

Von Baeyer, Hans Christian, *Informazione. Il nuovo linguaggio delle scienze*, Bari, Dedalo, 2005. Una accesible intorducción al concepto de información en todos sus aspectos.

La evolución

Boncinelli, Edoardo, *Perché non possiamo non dirci darwinisti*, Milán, Rizzoli, 2009. Simple y narrativo.

Mayr, Ernst, *Un lungo ragionamento. Genesi e sviluppo del pensiero darwiniano*, Turín, Bollati Boringhieri, 1994. Profundo y narrativo.

Tattersall, Ian, *Il cammino dell'uomo. Perché siamo diversi dagli altri animali*, Turín, Bollati Boringhieri, 2011. Se centra en la historia de la evolución humana.

Una exhaustiva introducción a la ecología

Smith, Thomas M. y Smith, Robert L., *Elementi di ecologia*, Milán, Pearson, 2007 (trad. cast.: *Ecología*, Madrid, Pearson Addison Wesley, 2007).

Sobre el origen histórico de la individualidad

Boncinelli, Edoardo, *Io sono tu sei. L'identità e la differenza negli uomini e in natura*, Milán, Mondadori, 2002.

El funcionamiento de nuestros sentidos

Boncinelli, Edoardo, *La vita della nostra mente*, Roma-Bari, Laterza, 2011.

Índice

Esta edición se terminó de imprimir en Altuna Impresores S.R.L.,
Doblas 1968, Ciudad de Buenos Aires,
en el mes de agosto de 2015.